

Kyösti Laukkanen, Rainer Laaksonen

## **Bitumia sisältävien kerrosstabilointien kehittämistutkimus**

Laboratoriokokeet

Tiehallinnon selvityksiä 44/2007

Kyösti Laukkanen, Rainer Laaksonen

# **Bitumia sisältävien kerrosstabilointien kehittämistutkimus**

Laboratoriokokeet

Tiehallinnon selvityksiä 44/2007

Tiehallinto  
Helsinki 2007



*Kannen kuva: Timo Unhola*

Verkkojulkaisu pdf ([www.tiehallinto.fi/julkaisut](http://www.tiehallinto.fi/julkaisut))

ISSN 1459-1553

ISBN 978-951-803-963-4

TIEH 3201070-v

**Tiehallinto**

Tietekniikka

Opastinsilta 12A

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelinvaihte 0204 22 11

**Kyösti Laukkanen, Rainer Laaksonen: Bitumia sisältävien kerrosstabilointien kehittämistutkimus. Laboratoriokokeet.** Helsinki 2007. Tiehallinto, Tietekniikka. Tiehallinnon selvityksiä 44/2007. 91 s. + liitt. 32 s. ISSN 1459-1553, ISBN 978-951-803-963-4, TIEH 3201070-v.

**Asiasanat:** tie, kantava kerros, komposiitti, rakenteen parantaminen, remix, stabilointi, vaahtobitumi, käyttöikä, tuotehyväksyntä

## TIIVISTELMÄ

Tutkimus loi perustan kerrosstabilointien käyttöön laboratorio- ja kenttäkokeisiin perustuvalle arviointimenetelmälle. Siihen sisältyi käyttöön arvioinnin referenssimateriaalien ja tutkimusmenetelmien kehitys sekä tutkittujen stabilointityyppien toiminnallisten ominaisuuksien tutkiminen ja niiden herkkyyksien selvitys koostumuksen ja tiiveyden vaihdellessa.

Stabilointinäytteiden valmistuksessa otettiin käyttöön menetelmä, jossa näytteet tiivistettiin kiertotiivistinkokeiden avulla valittuun tavoitetiiveyteen (Proctor-kokeisiin perustuvan tavoitetiiveyden sijasta). Kiertotiivistinmenetelmä soveltuu Proctoria paremmin erityisesti lämpimän, rouhetta sisältävän stabilointimassan tavoitetiiveyden määrittäminen menetelmäksi.

Tutkimuksessa todettiin tarpeelliseksi säilyttää mahdollisuus suhteittaa stabilointimassat joko kokemuseräisen tai kokeellisen suhteitusmenetelmän perusteella. Stabilointiohjeen kokemuseräisten kaavojen todettiin johtavan Remixer-stabiloinnin suhteituksessa deformaatiokestävyyden kannalta liian korkeisiin lisäbitumipitoisuuksiin. Deformoitumisriski kasvoi, jos näytteiden tiiveys oli alhainen. Remixer-stabiloinnin hyvä deformaatiokestävyys saavutettiin noin yhden %-yksikön alhaisemmalla bitumipitoisuudella kuin Stabilointiohjeen kokemuseräisten kaavojen mukaan laskettu pitoisuus.

Vaahtobitumistabilointinäytteiden ennakkokokeiden nopeuttamiseksi näytteiden säilytysaikaa voidaan tarvittaessa lyhentää säilyttämällä näytteitä +40 °C lämpötilassa. Vaahtobitumistabilointimassassa tulee käyttää tartuketta, ellei kokeellisesti osoiteta, että tartuketta ei tarvita. Tartuketarve voidaan osoittaa halkaisuvetolujuuteen perustuvan vedenkestävyyskokeen avulla.

Komposiittistabiloinnin sideainesuhde (sementti / bitumi-suhde) 0,33 on hyvä lähtökohta massan koostumuksen valinnalle. Sementti sitoo massan ylimääräistä vettä ja nopeuttaa alkulujuuden kehitystä. Komposiittistabilointinäytteet tulee säilyttää kosteassa ilmassa koestuksen aloitukseen asti.

Stabilointien ominaisuuksiin vaikuttavista tekijöistä ovat keskeisiä massan sideainepitoisuus, rakeisuus ja tiiveys. Tutkimuksen tuloksissa esitetään useita selvityksistä koostuva aineisto näiden parametrien vaikutuksesta massan ominaisuuksiin. Erityisesti tulee kiinnittää huomiota stabilointimassan tiivistämiseen sekä laboratorion näytevalmistuksessa että työmaaolosuhteissa.

Vaahtobitumi-, Remixer- ja komposiittistabiloinnista tutkittiin toiminnallisina ominaisuuksina veden-, pakkasen-, suolan- ja deformaationkestävyys sekä jäykkyysmoduuli.

Tutkimuksen tuloksena saatiin merkittävästi uutta tietoa stabilointien ominaisuuksista sekä niiden laatuun ja toimivuuteen vaikuttavista tekijöistä. Tämä tieto otettiin jo projektin aikana hyötykäyttöön viemälle se stabilointien rakentamishojeisiin ja toteutuskäytäntöön.



Kyösti Laukkanen, Rainer Laaksonen: Bituminous base course stabilization development project. Laboratory study. Helsinki 2007. Finnish National Road Administration. FINNRA Report 44/2007, 91 p. + app. 32 p. ISSN 1459-1553, ISBN 978-951-803-963-4, TIEH 3201070-v.

**Key words:** base course, composite, reconstruction, remix, cement, stabilization, foam bitumen, service life, product approval

## ABSTRACT

The study established the basis for stabilizations service life evaluation method based on laboratory tests and in-situ trials. It contained development of reference materials for service life evaluation, test methods for stabilization mixtures and research on functional properties and their sensitivities with different compositions and densities.

For specimen preparation a method was used where the specimens were compacted to a certain target density using gyratory compactor experiments (instead of Proctor experiments). A gyratory compactor method was better suited especially for choosing a target density of a warm stabilization mixture with recycled asphalt.

It was determined in the study that it is necessary to keep in service a possibility to proportion stabilization mixture either using an empirical or experimental method. The empirical equations for binder content calculations in the Stabilization specifications gave too high values from the deformation resistance point-of-view in proportion of a remixer stabilization mixture. A risk of deformation increased if the density of the specimen was low. A good deformation resistance of a remixer stabilization was achieved if the bitumen content was 1 % lower than the content calculated by empirical equations of the Stabilization specifications.

The preliminary trials of foam bitumen stabilization may be accelerated if necessary by storing the specimens at a temperature of +40 degrees centigrade. It was necessary to use an anti-stripping agent in a foam stabilization mixture, if it has not been shown that it is unnecessary. The need of an anti-stripping agent can be shown with a water resistance test.

A cement/bitumen ratio of 0,33 is a good basis for the mix design of a composite stabilization. Cement will bind extra water of the mix and accelerates the increase of the initial strength. The composite stabilization specimens must be stored in humid air until the start of the tests.

The essential points affecting the properties of a stabilization are binder content, gradation and density of the mixture. The results describe a data base of effects of these parameters consisting of many studies. Special attention must be paid to compaction of stabilization mixture both in laboratory specimen preparation and on site circumstances.

The studied functional properties of foam-, remixer- and composite stabilization were resistance to water, frost, salt and deformation both stiffness modulus.

Results of the study contain remarkable new information about the properties of the stabilizations and points affecting their quality and performance. This information was brought into use already during the research project through the construction specifications and construction practice.

## ESIPUHE

Tutkimus on osa INFRA-teknologiaohjelman projektista "Tien kerrosstabiloinnin käyttöikä ja tuotehyväksyntä" (Infra-Stabil).

Tutkimuksen rahoittajat ovat Tekes, Tiehallinto, Destia, Andament Oy, Lemminkäinen Oyj, NCC Roads Oy, Skanska Asfaltti Oy, Valtatie Oy, Rautaruukki Oyj ja Finnsementti Oy. Projektin johtoryhmään ovat kuuluneet:

Lars Forstén	Lemminkäinen Oyj, pj.
Tom Warras 31.8.2005 asti	TEKES
Osmo Rasimus 1.9.2005 – 31.5.2006	TEKES
Ilkka Jussila 1.9.2006 alkaen	TEKES
Harto Rätty 28.2.2006 asti	Infra-teknologiaohjelma
Kari Lehtonen	Tiehallinto
Teuvo Kasari	Destia
Seppo Määttänen	Lemminkäinen Oyj
Harri Ahola	Skanska Asfaltti Oy
Jukka Juola	Andament Oy
Alpo Mänttari 31.12.2005 asti	NCC Roads Oy
Petri Järvensivu 1.1.2006 alkaen	NCC Roads Oy
Sami Horttanainen	Valtatie Oy
Marko Mäkiyry	Rautaruukki Oyj
Pia Rämö	Finnsementti Oy

Lisäksi tutkimusta ohjaavaan laajennettuun johtoryhmään ovat kuuluneet seuraavat henkilöt:

Arvo Lähde	Tiehallinto, Vaasan tiepiiri
Mats Reihe 31.12.2006 asti	Tiehallinto
Tuomo Kallionpää	Tiehallinto
Katri Eskola	Tiehallinto
Taina Rantanen 30.4.2005 asti	Ins.tsto A-Tie Oy
Laura Apilo 31.8.2005 asti	VTT
Heikki Kukko 1.9.2005 alkaen	VTT
Rainer Laaksonen	VTT
Kyösti Laukkanen	VTT

Projektin johtoryhmä asetti työn tutkimusmenetelmäteknisiä asioita ohjaamaan pienryhmän, johon kuuluivat:

Lars Forstén	Lemminkäinen Oyj
Ilmo Hyyppä 30.4.2006 asti	TKK
Ville Alatypö 1.5.2006 alkaen	TKK
Rainer Laaksonen	VTT
Kyösti Laukkanen	VTT

Tutkimusraportin ovat laatineet dipl.ins. Kyösti Laukkanen ja dipl.ins. Rainer Laaksonen VTT:sta.

Helsingissä joulukuussa 2007

Tiehallinto  
Tietekniikka



**Sisältö**

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	<b>9</b>
1.1	Yleistä	9
1.2	Tavoite	9
1.3	Tehtävät	9
1.4	Vaikutukset	10
<b>2</b>	<b>AINEISTO JA MENETELMÄT</b>	<b>11</b>
2.1	Materiaalit	11
2.1.1	Raaka-aineet	11
2.1.2	Tutkitut stabilointimassatyypit	13
2.2	Suhteitusmenetelmät	15
2.2.1	Kokemusperäinen suhteitus	15
2.2.2	Kokeellinen suhteitus	16
2.3	Tutkimusmenetelmät	17
2.3.1	Yleistä	17
2.3.2	Näytevalmistus	18
2.3.3	Näytemäärä, säilytys- ja koestusolosuhteet	21
2.3.4	Halkaisuvetolujuskoe	22
2.3.5	Puristuslujuuskoe	22
2.3.6	Vedenkestävyyskoe	23
2.3.7	Deformaatiokoe (dynaaminen creep)	23
2.3.8	Jäykkyysmoduuli (1-aksiaalinen puristuskoe)	24
2.3.9	Pakkasenkestävyyskoe (jäädytys-sulatusmenetelmä)	25
2.3.10	Suola-pakkasenkestävyyskoe	26
2.3.11	Imupainekoe (TS-testi)	26
<b>3</b>	<b>TULOKSET</b>	<b>28</b>
3.1	Esikokeet	28
3.1.1	Hienoaineksen valintakokeet	28
3.1.2	Kosteus- ja tiiveysmäärittäykset	31
3.1.3	Näytteiden tiivistysmenetelmän valinta	35
3.1.4	Bitumin vaahdotuskokeet	36
3.1.5	Kiviaineksen vesipitoisuuden vaikutus lujuuteen	39
3.1.6	Näytteen valmistustavan ja korkeuden vaikutus moduuliin	40
3.1.7	Näytteen säilytystavan vaikutus lujuuteen	41
3.1.8	Tartuketarve	43
3.1.9	Suhteituskokeet	46
3.2	Toiminnalliset ominaisuudet	58
3.2.1	Tutkitut materiaalit	58
3.2.2	Perusvaihtoehtojen ominaisuudet	58
3.2.3	Toiminnalliset ominaisuudet massatyypeittäin	63

---

4	MENETELMIEN ARVIOINTI	84
5	SUOSITUKSET	85
6	YHTEENVETO	86
6.1	Yleistä	86
6.2	Stabilointien käyttöön arviointimenetelmien kehittäminen	86
6.3	Nykytilaselvityksen täydentäminen	86
6.4	Suhteitus, näytevalmistus ja tutkimusmenetelmät	87
6.5	Stabilointien ominaisuudet	87
6.6	Stabilointimenetelmän valinta	89
7	KIRJALLISUUSVIITTEET	90
8	LIITTEET	91

---



## 1 JOHDANTO

### 1.1 Yleistä

Kerrosstabilointi on tierakenteen parantamismenetelmä, jossa tien jakava tai kantava kerros tai kantavan kerroksen yläosa sidotaan bitumilla, sementillä tai masuunihiekalla tahi niiden yhdistelmällä. Tässä raportissa kerrosstabilointia kutsutaan yleensä lyhyemmin stabiloinniksi. Stabilointia tehdään sekä uusia teitä rakennettaessa että vanhoja teitä peruskorjattaessa. Yleensä kantavan kerroksen stabilointi kohdistuu vanhan tien rakenteen parantamiseen ja menetelmässä käytetään tielinjan vanhaa materiaalia, joka sekoitetaan uuteen kantavaan kerrokseen. Stabiloinnin vaihtoehtona ovat sitomaton kantava kerros tai kantavan kerroksen asfalttibetoni. Stabiloinnilla parannetaan tien kuorituskestävyyttä.

Tutkimus sisältyi INFRA-teknologiaohjelmaan projektina "Tien kerrosstabiloinnin käyttöikä ja tuotehyväksyntä, Infra-Stabil", joka sisälsi kolme osatutkimusta:

- Bitumia sisältävien kerrosstabilointien kehittämisen laboratoriotutkimus
- Referenssistabilointien täysmittakaavatutkimus
- Stabilointien käyttöä arvioinnin ja tuotehyväksynnän kehittämistutkimus.

Tämä raportti sisältää " Bitumia sisältävien kerrosstabilointien kehittämisen laboratoriotutkimuksen" tulokset kolmesta stabilointityypistä:

- vaahtobitumistabilointi (VBST)
- Remix-stabilointi (REST)
- komposiittistabilointi (KOST).

### 1.2 Tavoite

Tutkimuksen tavoitteena oli luoda pohja kerrosstabilointien kokeellisten käyttöä arviointimenetelmien kehittämiselle ja parantaa stabilointialan osaamista sekä stabilointeihin kohdistuvaa tutkimustietämystä.

### 1.3 Tehtävät

Tutkimus sisälsi seuraavat tehtävät:

- selvitetään stabilointien ominaisuudet ja niihin vaikuttavat tekijät joko aiempien tutkimusten perusteella tai laboratoriokeiden avulla pääosin tutkimuksen suoritusaikana käytössä olleita menetelmiä käyttäen
- selvitetään stabilointimassoille soveltuvat näytteenvalmistus-, suhteitus- ja tutkimusmenetelmät sekä tarvittaessa kehitetään niitä,
- luodaan perusta stabilointien käyttöä arviointimenetelmien kehittämiselle,
- täydennetään stabilointien nykytilaselvitystä Ruotsin ja Norjan kokemusten perusteella.

## 1.4 Vaikutukset

### Stabilointi

- on energiataloudellinen tuote, koska sen valmistuksessa käytetään pääosin kylmätekniikkaa ja pääosin rakennuspaikalta saatuja materiaaleja,
- on ympäristöä säästävä uusiotuote, koska luonnontilassa olevia kiviainesvaroja säästyy, kun stabiloinnin rakentamisessa kierrätetään vanhaa tiemateriaalia,
- edistää ilmansuojelutavoitteita, koska kylmätekniikka vähentää kaasupäästöjä ja
- edistää alueellista tasapuolisuutta, koska tuotteen käyttökohteet ovat suu-  
relta osin vähäliikenteisten teiden parantamiskohteita.

Jos stabilointien kestävyys ja samalla niiden kilpailukyky paranee, stabilointien osuus rakenteen parantamistoista kasvaa. Tästä seuraa, että soranotto-  
paikkojen käyttö vähenee ja rakenteen parantamistyöt pystytään toteutta-  
maan tiemaisemaan sopeutuvalla tavalla. Stabilointien kilpailukykyyn parane-  
minen edistää rakennusvientä lähialueille, esim. Baltian maihin.

Jos pohjoismaille luodaan yhtenäinen stabilointien tuotehyväksyntämenettely,  
se luo paremmat edellytykset stabilointien tuotekehittelylle laajemmille mark-  
kinoille. Tutkimuksen merkitystä stabilointialan yrityksille korostaa, että kaikki  
merkittävät stabilointiurakoitsijat osallistuivat suoraan tutkimuksen rahoituk-  
seen.



## 2 AINEISTO JA MENETELMÄT

### 2.1 Materiaalit

#### 2.1.1 Raaka-aineet

##### Kiviaines

Laboratoriotutkimuksen stabilointimassojen peruskiviainekseksi valittiin kalliomurske Teiskon granodioriitti, joka vastaa Suomessa yleisesti esiintyvää tavanomaista tierakennuskiviainesta. Sen saatavuus on hyvä ja raaka-aineen ottoapaikan kallio suhteellisen tasalaatuista. Materiaalin hyvä saatavuus on etu, koska sitä on tarkoitus käyttää myöhemmin mahdollisten stabilointien tuotehyväksyntäkokeiden vertailukiviaineksena. Teiskon granodioriitti oli myös ASTO- ja TPPT-projektien referenssikiviaineksena, joten sen ominaisuuksista on saatavissa runsaasti vertailuaineistoa.

Murskeen rakeisuusvaihtoehdot A – C, (liite 1) valittiin Asfalttinormien 2000 lisälehden kuvien 29 ja 30 mukaisten stabilointien yleisten ohjealueiden rajakäyrien perusteella. Rakeisuustavoitteen saavuttamiseksi murskeeseen lisättiin hienoaainesta. Lisättävä hienoaainesseos koottiin kaupallisesti saatavista hienoaainesmineraaleista. Erityisesti runsaasti hienoaainesta sisältäviin rakeisuuden A mukaisiin massoihin pyrittiin lisäämään hallitusti heikennettyä hienoaainesta, jotta käytettävät kiviainesvaihtoehdot sisältäisivät myös usein käytännössä esiintyvää ongelmallista hienoaainesta.

Esikokeissa kokeiltiin erilaisia hienoaineksia: joko suuren ominaispinta-alan omaavaa, massan lujuutta heikentävää tai tartuntaominaisuuksia heikentävää täytejauhetta (pyrkien jäljittelemään toistettavalla tavalla savisoraa sisältävän vanhan tien päällysrakenteen stabilointia).

##### Asfalttirouhe

Pääosa vaahtobitumi- ja komposiittistabilointimassoista valmistettiin ilman asfalttirouhetta, koska kokeiden tuli olla myöhemmin toistettavissa samalla massan koostumuksella. Aineistoon sisällytettiin kuitenkin myös rouhetta sisältävät koostumukset, koska rouhetta käytetään yleisesti tavanomaisessa stabiloinnin paikallasekoitusmenetelmässä. Muista stabilointityypeistä poiketen kaikissa Remix-stabilointimassoissa oli aina mukana rouhetta. Tutkimuksessa käytetyt rouhemateriaalit olivat Skanska Asfaltti Oy:n toimittamia jyrsitettyjä PAB- ja AB-rouheita. PAB-rouhe toimitettiin kahtena toimituseränä, joista erän 1 rouheen bitumi oli kovempaa kuin erän 2 bitumi, taulukko 1.

Taulukko 1. Tutkimuksessa käytetyt bitumit ja asfalttirouheet.

BITUMIT		Yks		
Valm. pvm.			17.2.2004	
Määrittäminen pvm.				29.11.2004
Toimitettu bitumituote			B70/100	B160/220 B650/900
Tunkeumatulos (25 °C)	1/10 mm	77,1	188	
Tunkeumavaatimus (25 °C)	1/10 mm	70-100	160-220	
Tunkeumatulos (15 °C)	1/10 mm			280
Tunkeumavaatimus (15 °C)	1/10 mm			180-360
<b>REST:iin lisätty bitumiemulsio</b>				
Emulsioerän saap.pvm.			1.11.2004	
Emulsion valmistaja			Akzo Nobel	
Bitumipohjan toimittaja			Nynas Oy	
Bitumilaji			B160/220	
Emulgaattori			Akzo Nobel 44	
Emulg.pitoisuus	%	0,3		
Tartuke		ei		
Haihdutusjäännös	%	62	ASTM D 244	
<b>ASFALTTIROUHE</b>		Yks		Toimituserä 1 Toimituserä 2
Asfalttirouheen lähtömateriaali			AB	PAB PAB
Rouheen bitumin tunkeuma (25 °C)	1/10 mm	85	143	
Rouheen bitumin tunkeuma (15 °C)	1/10 mm			92
Rouheen bitumipitoisuus		5,1	4,5	2,9
Rouheen kosteus tuotaessa		3,2	2,3	2,5
Rouheen massan tiheys	kg/m <sup>3</sup>		2517	2541

### Sideaineet

Vaahtobitumi- ja komposiittistabilointimassojen bitumisen sideaineen perusvaihtoehto oli Nynas Oy:n toimittama bitumi B160/220. Lisäksi tutkimuksessa oli mukana samalta valmistajalta yksi kovempi bitumi (B70/100) ja yksi pehmeämpi bitumi (B650/900), taulukko 1.

Remix-stabiloinnin sideaine oli Akzo Nobelin valmistama, Skanska Asfaltti Oy:n toimittama bitumiemulsio, jonka bitumipohja oli Nynas Oy:n bitumi B160/220 ja bitumipitoisuus 62 %, taulukko 1.

Komposiittistabiloinnin hydrauliseksi sideaineeksi valittiin Finnsementti Oy:n valmistama SR-sementti. Sementtilajin valinnan perustelu oli, että SR-sementti puhtaana Portlandsementtinä ei sisällä kuonaa, joten sen koostumus vaihtelee vähemmän kuin kuonaa sisältävän Yleissementin koostumus. Tutkittavia referenssistabilointimassoja oli suunniteltu käytettävän myöhempiä vuosina tutkittavien merkkituotemassojen vertailumateriaaleina. SR-sementin arvioitiin soveltuvan paremmin kuin Yleissementin näiden referenssimateriaalien sideaineeksi.

### Lisäaineet

Vaahtobitumi- ja komposiittistabilointimassanäytteitä valmistettiin sekä tartukkeen kanssa että ilman tartuketta. Tartuketarve ratkaistiin esikokeiden perusteella. Käytettävä tartuke oli Raisio Yhtymän valmistama diamiini Raisamin DT.

Remix-stabilointimassassa ei käytetty erikseen lisättyä tartuketta. Massan bitumiemulsio sisälsi emulgaattoria Akzo Nobel 44.

### 2.1.2 Tutkitut stabilointimassatyypit

Osatutkimus "Bitumia sisältävien kerrostabilointien kehittämisen laboratorio-tutkimus" rajattiin kolmeen Stabilointiohjeen [1] mukaiseen massatyyppiin: VBST, REST ja KOST. Massat valmistettiin kohdan 2.1.1 mukaisista materiaaleista. Kullekin stabilointityypille suhteitettiin tavoitekoostumus. Ominaisuuksien herkkyyttä koostumuksen ja tiiveyden muutoksille tutkittiin massoilla, jotka valmistettiin suhteituskokeiden perusteella valitusta tavoitekoostumuksesta poikkeavin sideainepitoisuuksin ja erilaisin tiiveyksin. Erilaisia stabilointimassakoostumuksia tutkittiin 43 kpl, taulukko 2.

Kunkin stabilointityypin eri koostumusvaihtoehtojen valinnassa noudatettiin seuraavia tutkimusfilosofia-periaatteita:

- Tutkimustulosten avulla luotiin pohja stabilointimassojen referenssiaineiston kehittämiseksi ja siksi kiviainekseksi valittiin Teiskon granodioriitti, joka vastaa tavanomaista suomalaista stabiloinneissa käytettävää kiviainesta. Jotta myöhemmin pystyttäisiin valmistamaan uudelleen mahdollisimman saman koostumuksen omaavia referenssimassoja, valmistettiin pääosa massoista ilman asfalttirouhetta.
- Tutkittavat stabilointimassat vastasivat kiviaines- ja sideainekoostumukseen sekä valmistusmenetelmältään tavanomaista, Tiehallinnon ohjeiden mukaisia stabilointimassoja





- Stabilointinäytteiden kiviainesten tavoiterakeisuuksille valittiin kolme vaihtoehtoa, jotka oli muokattu Asfalttinormien 2000 lisälehden 2003 ohjerakeisuuskuvien 29 ja 30 rajakäyrien perusteella. Rakeisuuskäyrien yläpäästä katkaistiin näytevalmistusteknisistä syistä, ks. liite 1.
- Massaan lisättiin tarvittaessa Teiskon granodioriitin mineraalikoostumuksen omaavaa hienoainesseosta, jotta päästiin tavoiterakeisuuksiin. Hienoainesseos yhdistettiin kaupallisesti saatavista mineraaleista,
- Vaahtobitumistabilointien sideaineisiin päädyttiin lisäämään tartuketta ennakkokokeiden perusteella,
- Kunkin stabilointityypin yksi massakoostumus valittiin perusvaihtoehdoksi, johon verrattiin saman stabilointityypin muita koostumuksia. Perusvaihtoehtoissa oli liitteen 1 mukainen kiviaineksen rakeisuus B, bitumilaji B160/220, sideainepitoisuudet optimin mukaisia, tavoitetiiveys 95 % parannetusta Proctor-tiiveydestä (tai 96 % kiertotiivistimellä 200 r tiivistetyn näytteen tiiveydestä),
- Muut massakoostumukset poikkesivat perusvaihtoehdosta joko kiviaineksen rakeisuuskäyrän, rouhepitoisuuden, bitumilajin, sideainepitoisuuden, näytteen tiiveyden tai sekoituslämpötilan osalta.

## 2.2 Suhteitusmenetelmät

Kaikille suhteitustavoille on yhteistä, että niiden avulla pyritään optimoimaan stabilointimassan koostumus (sideainepitoisuus, vesipitoisuus, rakeisuus) asetetun suhteitustavoitteen suhteen. Tiehallinnon Stabilointiohjeessa [1] on esitetty useita eri tapoja stabilointimassojen koostumuksen valitsemiseksi:

- kokemusperäinen suhteitus (laskentakaavojen perusteella)
- puolianalyttinen suhteitus
- tilavuussuhteitus kokeellisesti
- koossapysyvyyteen (HVL 7d/ 10 °C) perustuva menetelmä
- imupainekokeeseen (TS-testi) perustuva menetelmä.

### 2.2.1 Kokemusperäinen suhteitus

#### Ohjeellinen bitumipitoisuus hienoainespitoisuuden perusteella

Bitumistabiloinnin ohjeellisen sideainepitoisuuden kokemusperäinen määrittäminen kaavalla 1 perustuu kiviaineksen hienoainespitoisuuden ja sideainetarpeen väliseen yhteyteen. Vastaava kaava on käytössä myös esim. Norjassa.

$$SAP = 0,14 \times p_{63} + 2,6 \quad (1)$$

jossa

SAP = sideainepitoisuus (massa-%),

p<sub>63</sub> = kiviaineksen keskimääräinen 0,063 mm läpäisyarvo (massa-%).

Puolianalyttinen suhteitus

Kiviaineksen tyhjätila voidaan laskea kaavalla 2, kun tunnetaan rakeisuuskäyrä ja hienoaineksesta määritetty tyhjätila  $KAT < 0,063$ .

$$KAT_n = F \left[ \frac{f(P_n)}{P_{n-1}} \right] * KAT_{n-1} \quad (2)$$

jossa

- $KAT_n$  = seulan n läpäisseen kiviaineksen tyhjätila,  
 $KAT_{n-1}$  = seulaa n edeltäneen seulan läpäisseen kiviaineksen tyhjätila,  
 $P_n$  = seulan n läpäisyprosentti,  
 $P_{n-1}$  = seulaa n edeltäneen seulan läpäisyprosentti,  
 $F$  = tyhjätilan vähennyskerroin.

Menetelmässä käytetään kokemusperäisesti määritettyjä kiviaineksen tyhjätilan vähennyskerroin  $F$ , jotka saadaan peräkkäisten seulojen läpäisyprosenttien suhteesta mm. Stabilointiohjeessa [1] esitetystä taulukosta.

Asfalttirouheen vaikutus lisäbitumipitoisuuteen

Jos stabiloitavassa massassa käytetään asfalttirouhetta, lisäbitumipitoisuus lasketaan kaavalla 3:

$$SAP_L = SAP_0 - k \times \frac{RC}{100} \times SAP_R \quad (3)$$

jossa

- $SAP_L$  = massaan lisättävä sideainepitoisuus (massa-%)  
 $SAP_0$  = tavoitesideainepitoisuus (massa-%) kaavalla 1 tai 2 laskettuna  
 $SAP_R$  = rouheen sideainepitoisuus, (massa-%)  
 $RC$  = asfalttirouheen osuus massassa, (massa-%)  
 $k$  = rouheen sitoutumiskerroin, joka valitaan päällystetyypin ja käytetyn työtekniikan mukaan seuraavasti:  
 - PAB:  $k = 0,5 \dots 0,8$   
 - AB esijyrsitty:  $k = 0,5$   
 - AB tuore tai elvytetty jyrsinrouhe:  $k = 0,7 \dots 0,9$ .

Sitoutumiskerroin voidaan valita sitä suuremmaksi, mitä hienommaksi ja tasalaatuisemmaksi vanha päällyste on jyrsitty. Tällöin vanha sideaine tulee kaikin tehokkaimmin käytettyä hyödyksi stabilointia tehtäessä.

**2.2.2 Kokeellinen suhteitus**

Vaikka kokeellisesti määritetyllä sideainepitoisuudella vaaditut toiminnalliset laatuvaatimukset täyttyisivätkin laboratoriossa, Stabilointiohjeen mukaan ei ohjesideainepitoisuus saa kuitenkaan olla kuin enintään 20 % pienempi kuin kaavalla 1 kokemusperäisesti määritetty sideainepitoisuus.



Suhteitus voidaan tehdä määrittämällä tilavuussuhteet laboratoriossa valmistetuista ja tiivistetyistä näytteistä. Tiivistetyistä näytteistä määritetään tilavuussuhteet eri sideainepitoisuuksilla. Tiivistys tehdään kiertotiivistimellä samalla tavalla kuin päällysteitä suhteitettaessa.

Suhteitusta varten stabilointimassat valmistetaan laboratoriossa asfalttisekoittimella mahdollisimman hyvin käytännön sekoitustyötä vastaavasti.

Massa tiivistetään yleensä joko kiertotiivistimellä (ICT) tai Kango-tiivistysvasaralla vakiomenetelmin vertailtavuuden säilyttämiseksi. Stabilointimassa sisältävät yleensä 16 mm suurempia kiviä, joten niille on käytettävä läpimitaltaan 150 mm muotteja. Yli 32 mm kivet tulee poistaa ennen massojen valmistusta.

Massanäytteistä tutkitaan yksi tai useampia suhteituksen perustana olevia ominaisuuksia, jotka voivat olla esim. seuraavia:

- puristuslujuus
- halkaisuvetolujuus
- vedenkestävyys
- deformaatiokestävyys
- jäykkyysmoduuli
- pakkasenkestävyys
- tilavuussuhteet
- dielektrisyys (minimisideainepitoisuus, jolla hienoinen saadaan sidottua).

Suhteitusmäärityksissä on useita olosuhdemuuttujia, kuten näytteen valmistus- ja säilytystapa, näytteen koestuslämpötila ja kosteus, koestusmenetelmä.

Kokeellisen suhteitusmenetelmän tehokas käyttö edellyttää, että tutkittavalle massalle on asetettu yksi tai useampia suhteituskriteerejä (yleensä tuotteen olennaisen ominaisuuden tunnusluvun vaihteluväli, minimi- tai maksimiarvo).

## 2.3 Tutkimusmenetelmät

### 2.3.1 Yleistä

Stabilointien ominaisuuksien tutkimusmenetelminä käytettiin bitumilla tai sementillä sidottujen päällysteiden tutkimusmenetelmiä. Perusmenetelmä useiden ominaisuuksien tutkimisessa on halkaisuvetolujuus, jonka avulla tutkittiin näytteiden lujuuden muutoksia eri lämpötiloissa tai erilaisten rasitusten jälkeen (vesi-, pakkas- ja/tai suolarasitus). Halkaisuvetolujuusmenetelmän etu on sen suhteellisen alhainen hinta ja vertailukelpoisuus muilla materiaaleilla aiemmin tehtyihin tuloksiin.

Bitumilla sidottuja materiaaleja on perinteisesti tutkittu halkaisuvetolujuuskokeilla ja sementillä sidottuja materiaaleja on vastaavasti tutkittu puristuslujuuskokeella ja rakentamisohjeiden laatuvaatimukset perustuvat suurelta osin näihin menetelmiin.

Muut menetelmät valittiin siten, että niillä mitattiin stabiloitujen rakennekerrosten mitoituksessa tarvittavaa jäykkyysmoduulia tai rakennekerrokselta käyttöolosuhteissa vaadittavia keskeisiä ominaisuuksia (deformaatiokestävyys, veden-, pakkasen- ja suolankestävyys).

### 2.3.2 Näytevalmistus

Stabilointimassat sekoitettiin laboratoriossa asfaltinsekoittimella ja näytteet tiivistettiin kiertotiivistimellä (ICT 150) noin 155 mm korkuisiksi.

#### Vaahtobitumistabilointi

Vaahtobitumistabilointimassat sekoitettiin laboratorion isolla sekoittimella, jossa annoskoko oli noin 28 kg. Tartuke lisättiin kuumaan bitumiin ennen vaahdotusta. Esikokeiden jälkeen bitumi vaahdotettiin käsityönä (bitumin vaahdotuslämpötila 170 °C ja vaahdon vesipitoisuus 2,5 % bitumin määrästä). Kuuma bitumivaahdotus kaadettiin käynnissä olevassa sekoittimessa olevien kiviainesten (T= 20-23 °C) päälle.

Massan vesipitoisuudeksi valittiin Proctor-kokeen mukaisen optimivesipitoisuuden ja lisäbitumipitoisuuden erotus ottaen huomioon, että massan minimivesipitoisuus oli 2,5 %. Yhdestä sekoitusannoksesta tiivistettiin 3 – 4 näytettä. VBST-näytteet tiivistettiin Proctor-kokeiden perusteella tai uusintakokeissa ICT-kokeiden perusteella valittuun tavoitetiiveyteen.

VBST-massojen tiivistäminen onnistui pääosin hyvin. Kolmella massakoostumuksella (V1-A, V3-A ja V15-C) tiivistämisessä on epätarkkuutta, koska ne on tiivistetty 98-100 % Proctor-tiiveyteen, kun tavoite oli 95 %. Massat V1-A ja V3-A ovat rakeisuutta A ja massa V15-C rakeisuutta C. Näiden massojen osalta uusittiin vedenkestävyyskokeet siten, että uusintakokeissa näytteet tiivistettiin 96 %:iin ICT:n 200 r vastaavasta tiiveydestä.

#### Komposiittistabilointi

KOST-massan sementin ja bitumin pitoisuuksien suhteeksi valittiin ennakkokokeiden perusteella 0,33. Sementin pitoisuus laskettiin runkoaineksen kuivamassasta ja bitumin pitoisuus stabiloinnin kuivamassasta. Massan vesipitoisuudeksi valittiin optimikosteuden ja lisäbitumipitoisuuden erotus.

KOST-massat sekoitettiin isolla laboratoriosekoittimella. Osa-aineet lisättiin annokseen lämpötilassa 20-23 °C. Näytteet tiivistettiin ICT:llä pyrkien siihen, että näytteen kiviainesrungon kuivatilavuus vastaisi Proctor-kokeen perusteella valittua tavoitetiiveyttä (90 – 95 % Proctor-tiiveydestä).

#### Remix-stabilointi

REST-massa sekoitettiin yksi näyte kerrallaan pienellä laboratoriosekoittimella. Lisäbitumi lisättiin massaan emulsiona.

REST-massan valmistuksessa osa-aineiden lämpötilat olivat:

- |                 |          |
|-----------------|----------|
| – PAB-B-rouhe   | 75 °C    |
| – AB-rouhe      | 95 °C    |
| – Lisäkiviaines | 20-23 °C |
| – Bitumiemulsio | 45 °C.   |

Massan vesipitoisuus valittiin aluksi siten, että lämpimään, kuivaan asfaltti-rouheeseen sekoitettiin ensin 3 % vettä sisältävät kiviainekset ja sen jälkeen bitumiemulsio. Uusintakokeissa runkoainekseen (kiviaines + rouhe) sekoitettiin ensin vettä 2,5 % ja sen jälkeen massaan lisättiin emulsio.



### Tiivistäminen

Suhteituskokeissa näytteet tiivistettiin vakiotiivistystyömäärällä (yleensä 100 tiivistyskierrosta). Näin meneteltiin, koska sideainepitoisuus vaikuttaa tiivistettyvyyteen ja tämä ero saadaan selville vakiotiivistystyömäärää käytettäessä. ICT:n asetusparametrit olivat: paine näytteen pinnassa 600 kPa, kulma 17,5 mrad ja kierrosnopeus 30,6 rpm.

Teoriassa oikea tiivistystapa olisi tiivistää näytteet siihen tiiveyteen, joka saavutetaan työmaalla. Tiivistystavan tulisi muutoinkin jäljitellä maastossa käytettävää jyrän tiivistystyötä. Laboratoriossa näytteitä voidaan tiivistää iskemällä (esim. Marshall), täryttämällä (esim. täryvasara), kiertotiivistimellä, staattisesti puristamalla, staattisella tai dynaamisella jyräyksellä. Iskevät laitteet voivat rikkoa kivirakeita ja kiertävät laitteet voivat lajittaa niitä.

Kun näytteet tiivistetään vakio kierros määrällä, rinnakkaisnäytteiden tiiveydet vaihtelevat mm. massan epähomogeenisuudesta, emulsion murtumisasteesta, lämpötilasta ja massan tiivistyshetken iästä riippuen (massan ikä on aikaväli sekoituksesta tiivistyksen päättymiseen). Jos näytteet tiivistetään erittäin tiiviiksi, niiden tutkimustulosten välinen hajonta pienenee, mutta samalla näytteistä tehdään olennaisesti lujempia kuin mihin työmaaolosuhteissa päästään.

Kun valmistettiin näytteitä toiminnallisten ominaisuuksien testeihin, pyrittiin rinnakkaisnäytteet tiivistämään valittuun tavoitetiiveyteen ja tällöin tiivistämiseen käytetyn kierros määrän sallittiin vaihdella näytekohtaisesti. Näytteiden tavoitetiiveydet valittiin tutkimuksen alussa Proctor-kokeiden tai niiden perusteella laskettujen arvojen perusteella ja myöhemmin ICT-laitteen avulla. Proctor-kokeet tehtiin ilman massa an lisättävää bitumia. ICT-kokeissa lisäbitumi oli mukana. Erilaisten koostumusten suuren määrän vuoksi kaikille koostumuksille ei tehty Proctor- tai ICT-tiivistyskokeita, vaan osalle massoista tavoitetiiveys arvioitiin muiden koostumusten tavoitetiivistulosten perusteella.

Toiminnallisten ominaisuuksien tutkimusten pääosan valmistumisen jälkeen todettiin, että REST-massojen tiiviy s oli jäänyt alhaiseksi, mikä johti olennaisesti heikompiin lujuuksiin kuin esim. suhteituskokeissa saavutettiin vakiotiivistystyömäärällä 100 r. Lämmin, rouhepitoinen massa tiivistyi huomoin Proctorissa kuin esim. saman rakeisuuden omaava vaahtobitumistabilointi ja tämän arvioitiin johtaneen liian alhaisen tiiveystavoitteen valintaan.

REST-näytteiden alhaisten tiiviyksien vuoksi päätettiin muuttaa tavoitetiiveyden määritystapaa ja tutkia ICT:n soveltuvuutta tavoitetiiveyden määrittämiseen. ICT päätettiin ottaa käyttöön myös muille massoille, koska tällöin näytevalmistuksen ja tavoitetiiveyden tiivistysmenetelmät ovat samanlaisia. Tätä vaihtoehtoista menetelmää käyttäen valmistettiin näytteet pakkas-suolakokeisiin ja myöhemmin tehtiin VBST- ja REST-massan lisäkokeisiin.

Näytteiden tavoitetiiveys "95 % parannetusta Proctor-tiiveydestä" korvattiin tavoitetiiveydellä "96 % ICT:n kierros määrää 200 r vastaavasta tiiveydestä". ICT-tiivistyksen tavoitetaso (96 %) perustuu norjalaisen Telemark-projektin mukaiseen emulsiostabilointimassan tiivistystavoitekriteeriin [7]. Pääosa Stabilointien kehittämistutkimuksen koostumuksista oli suunniteltu tiivistettäväksi 95 %:iin Proctor-tiivedestä. Kolmen koostumuksen tavoitetiiveys oli 90 % Proctorista ja yhden 85 % Proctorista. Tavoitetiiveyksien suunnitellut raja-arvot muutettiin Proctorin mukaisista ICT:n mukaisiksi lineaarisesti taulukon 3 mukaan.



Taulukko 3. Proctor-tiivistystavoitteen korvaaminen ICT-tiivistystavoitteella.

Tavoitetiiveys	
Proctor	ICT 200r
%	%
100	100
95	96
90	92
85	88

HUOM. Taulukko 3 ei edusta yleistä riippuvuutta ICT:n ja Proctorin tuottamien tiiveyksien välille. Koska nämä laitteet tiivistävät materiaalia eri tavoin, or niiden välinen yhteys riippuvainen massakoostumuksesta.

REST-näytteiden heikolle tiivistymisen todennäköisiä syitä ovat olleet:

- Proctor-kokeessa REST-massan lämpimän rouhe-kiviainesseoksen maksimikuivairtiheys jäi alhaiseksi, minkä johdosta myös valittu tavoitetiiveys jäi alhaiseksi. Proctor-kokeen perusteella valittu tavoitetiiveys oli noin 6 % alhaisempi kuin ICT:n perusteella (uusintakokeisiin) valittu vastaava arvo (massa R7-B), taul. 4.
- toiminnallisten ominaisuuksien tutkimusten ensi vaiheen REST-massojen valmistusreseptissä olleen virheen vuoksi REST:in tiheys oli jäänyt edelleen noin 1 – 3 % valittua tavoitetiiveyttä alhaisemmaksi. Tältä osin REST-näytteiden toteutuneet kuivairtiheydet on laskettu jakamalla muottiin massareseptin mukaan pantu kuivamassamäärä ICT:n mittaamalla näytetilavuudella.
- Näytteiden bitumipitoisuus oli liian korkea. Korkeisiin bitumipitoisuuksiin oli keskeinen syy, että kokemuseräiset kaavat ohjasivat lisäbitumipitoisuuden valintaa korkeisiin pitoisuuksiin. Kokemuseräinen, rouhetta sisältävän stabilointimassan lisäbitumipitoisuuden laskentakaava antaa korkeampia lisäbitumipitoisuuksia kuin käytännössä käytetään työmaalla.

Lisäkokeissa (massat R2-A ja R8-B) näytteet deformatuivat, vaikka niiden tiivistäminen onnistui hyvin. Uusintakokeen näytteiden deformatumista edisti korkea bitumipitoisuus, joka oli edelleen lähellä kokemuseräisen kaavan ohjeellista tasoa.

Tämän jälkeen haettiin deformaatioherkkyyden raja-arvoa (massat R3-A, R4-A, R9-B, R10-B, R15-C ja R16-C) käyttäen työmaalla käytettävää bitumipitoisuustasoa, joka oli noin 0,7-1,3 prosenttiyksikköä alhaisempi kuin kokemuseräisen kaavan mukaan valittu pitoisuus. Näillä bitumipitoisuuksilla valmistetuilla REST-massakoostumuksilla oli hyvä deformaatiokestävyys ja ne täyttivät Asfalttinormien deformaatioluokan I mukaisen vaatimuksen.

Koostumukseltaan REST-massa erosi muista tutkimuksen massoista myös siten, että REST-massoissa oli runsaasti (yleensä 50 %) rouhetta. Sen sijaan esim. VBST-massa tehtiin yleensä ilman rouhetta ja tällöin isot kivirakeet olivat paljaita ja tukeutuivat toisiinsa, mikä vähensi deformaatioriskiä.

Taulukko 4. Näytteiden tiivistystavoitteen valinta Proctorilla ja ICT:llä.

Massatyyp		REST		VBST		VBST		VBST	
		R7-B	R8-B	V1-A	V2-A	V8-B	V9B	V15-C	V16-C
Rakeisuus		B	B	A	A	B	B	C	C
Lisäbitumipitoisuus	%	1,8	2,7	4,2	4,2	4,0	4,0	3,3	3,3
Kokonaisbitumipitoisuus	%	4,0	4,1	4,2	4,2	4,0	4,0	3,3	3,3
PAB-rouheen toimituserä		erä 1	erä 2						
Rouhepitoisuus	%	50	50	0	0	0	0	0	0
Stabilointinäytteen tyhjätila	%	17,1	9,6		13,7		12,4		18,0
Kuivairtotiheystavoite (ilman lisäbit.) 96 % ICT 200 r tiiveydestä	kg/m <sup>3</sup>		2202		2089		2127		2066
Kuivairtotiheystavoite (ilman lisäbit.) 95 % Proctor tiiveydestä	kg/m <sup>3</sup>	2073		2087		2144		2026	
Tiheystavoitteiden ero	kg/m <sup>3</sup>	129		2		-17		40	
	%	6,2		0,1		-0,8		2,0	

Jos taulukon 4 REST- koostumuksen R7-B näytteen tyhjätilasta (noin 17 %) vähennetään ICT:n ja samaa rakeisuutta olevan näytteen R8-B Proctorin tiheystavoitteiden ero (noin 6 %) ja reseptivirheestä johtunut tiheysero (noin 2 %), erotus (9 %) on varsin lähellä lisäkokeen näytteen "R8-B" tyhjätilaa (9,6 %).

### 2.3.3 Näytemäärä, säilytys- ja koestusolosuhteet

Näytteiden säilytysolosuhteet niiden valmistuksen ja koestuksen välisenä aikana valittiin massan sideaineen lajin perusteella. Varastointilämpötila oli noin 23 °C. VBST- ja REST- näytteet säilytettiin huoneilmassa ritilän päällä. KOST-näytteet säilytettiin kosteissa olosuhteissa (RH 90-95 %).

Kosteusolosuhteet vaikuttavat näytteiden lujittumiseen. Vaahtobitumilla tai bitumiemulsiolla sidottu massa ei lujitu kunnolla hyvin kosteissa olosuhteissa. Sementillä sidotun massan lujittumista tehostaa ja säröilyriskiä vähentää, kun näyte lujittuu kosteissa olosuhteissa.

Suhteituskoenäytteitä varastoitiin pääsääntöisesti 7 vrk ennen niiden koestukseen liittyviä esikäsittelyjä (mahdollinen rikitys, vesiupotus, temperointi).

Vedenkestävyys vesisäilytyksen jälkeen ja pakkasenkestävyys tai suolan- ja pakkasenkestävyys syklisen jäädytys-sulatussykliä jälkeen tutkittiin halkaisuvetolujuus- tai puristuslujuuskokeella. Koemenetelmät on kuvattu kohdissa 2.3.4 - 2.3.10. Toiminnallisia ominaisuuksia tutkittaessa koestukseen liittyvät esikäsittelyt tai vanhennukset (jäädytys-sulatus-sykli tai suola-pakkasvanhennussykli) aloitettiin, kun näytteiden ikä oli 28 d. Toiminnallisten ominaisuuksien tutkimusten rinnakkaisnäytteiden määrät, syklisten jäädytys-sulatuskokeiden vanhennusten aloitusikä ja vanhennusolosuhteet on esitetty taulukossa 5.



Taulukko 5. Rinnakkaisnäytteiden määrät, jäädytys-sulatusvanhennus- ja koestusolosuhteet toiminnallisten ominaisuuksien tutkimuksissa.

	Rinnakkais- näytteitä	Jäädytys- sulatusvanh. aloitusikä	Vanhennus- lämpötilä	Koestus- ikä	Koestus- lämpötilä
	kpl	d	°C	d	°C
Vedenkestävyys	3 + 3			28+3	10
Pakkasenkestävyys	3 + 3	28	-20 / 20	28 d+ 20 sykliä	10
Suola-pakkaskestävyys	3 + 3	28	-20 / 20	28 d+ 20 sykliä	10
Deformaatio (Dyn. Creep)	3			28	40
Dyn. jäykkyysmoduuli	2			28	15 tai 5, 15 ja 25

### 2.3.4 Halkaisuvetolujuuskoe

Halkaisuvetolujuus on lieriömäisen koekappaleen sivusuuntaisessa puristus-kokeessa määritetystä murtokuormituksesta laskettu epäsuora vetolujuus. Halkaisuvetolujuuskokeet suoritettiin +10 °C:ssa menetelmällä SFS-EN 12697-23, joka on korvannut aiemman menetelmän PANK-4202 mukaisesti.

Kokeessa puristettiin koekappalelieriön vaippaa kahdella lieriön keskiakselin suuntaisella teräspalkilla vakionopeudella 50 mm/min. Ennen koestusta näytteet temperoitiin tutkimuslämpötilaan. Kokeen aikana mitattiin leukojen siirtymä sekä näytteeseen kohdistuva voima siirtymän funktiona. Halkaisuvetolujuus laskettiin kaavalla 4:

$$\sigma_{\max} = \frac{2 * P_{\max}}{\pi * d * h} \quad (4)$$

jossa  $\sigma_{\max}$  = halkaisuvetolujuus [MPa]  
 $P_{\max}$  = maksimikuorma [N]  
 $d$  = koekappaleen halkaisija [mm]  
 $h$  = koekappaleen korkeus [mm].

Halkaisuvetolujuuskokeen tuloksista laskettiin myös halkaisuvetojäykkyys menetelmän PANK-4202 mukaisesti kaavalla 5:

$$E = \frac{P_m}{h * \varepsilon} \quad (5)$$

jossa  $E$  = halkaisuvetojäykkyys, [MPa]  
 $P_m$  = murtovoima, [N]  
 $h$  = näytteen korkeus, [mm]  
 $\varepsilon$  = muodonmuutos maksimivoiman kohdalla, [mm].

### 2.3.5 Puristuslujuuskoe

Puristuslujuus määritettiin menetelmällä SFS-EN 13286-41. Puristuslujuuskokeen näytekoko oli: D 150 mm ja korkeus noin 155 mm. Näytteiden molemmat päät rikitettiin koestusta edeltävänä päivänä. Rikityksen jälkeen puristuslujuusnäytteet temperoitiin yli yön koestuslämpötilaan temperointikaapissa.



Jos näyte oli ollut ennen temperointia kosteatasäilytyksessä, sen vaippapinnat suojattiin kelmulla, jotta se ei kuivunut temperoinnin aikana.

Puristuslujuuskokeen koestuslämpötila on 20 °C. Näytteet puristettiin menetelmästä SFS-EN 13286-41 poiketen vakiosiirtymänopeudella 1,6 mm/min, joka vastaa kuormitusnopeutta noin 1 % näytekorkeudesta minuutissa.

Puristuslujuuskokeessa määritettiin puristusvoima laitteen kuormitusleukojen siirtymän eli näytteen kokoonpuristuman funktiona. Puristuslujuus on maksimivoima jaettuna kuormitusalueen pinta-alalla. Tulos laskettiin kolmen rinnakkaisnäytteen keskiarvona.

### 2.3.6 Vedenkestävyyskoe

Vedenkestävyys tutkittiin halkaisuvetolujuuteen perustuvalla menetelmällä SFS-EN 12697-12, joka on korvannut menetelmän PANK 4301. Näytteet valmistettiin kiertotiivistimellä (näytekokoo: läpimitta 150 mm ja korkeus noin 155 mm). Yhtä vedenkestävyyskoea varten valmistettiin 6 näytettä.

Sen jälkeen, kun näytteitä oli säilytetty valittu varastointiaika (suhteituskoe-näytteet 7 vrk ja toiminnallisten ominaisuuksien näytteet 28 vrk), märkinä koestettavat eli puolet näytteistä upotettiin veteen (40 °C) kolmen vuorokauden ajaksi. Stabilointinäytteiden osalta poikettiin PANK 4301-menetelmästä siten, ettei näytteitä imeytetty alipaineessa, koska näytteet olivat pääosin hauraita ja niiden tyhjätila on korkea.

Kuivina koestettavat näytteet säilytettiin temperointiajan lämpökaapissa (40 °C) yhtä pitkä aika (3 vrk). Kuivina koestettavat näytteet suojattiin muovipussilla, jotta ne eivät kuivuneet lämpökaapissa säilytyksen aikana.

Seuraavassa vaiheessa märkinä koestettavat näytteet temperoitiin vedessä (10 °C) ja kuivina koestettavat näytteet temperoitiin ilmassa (10 °C) muovilla suojattuina.

Temperoinnin jälkeen kaikille näytteille tehtiin halkaisuvetolujuuskoe lämpötilassa 10 °C (ks. kohta 2.3.3).

Vedenkestävyys (tarttuvuusluku) laskettiin märkinä ja kuivina koestettujen näytteiden halkaisuvetolujuuksien keskiarvojen suhteena kaavalla 6

$$Q = 100 \times \frac{\sigma_{\text{märkä}}}{\sigma_{\text{kuiva}}} \quad (6)$$

### 2.3.7 Deformaatiokoe (dynaaminen creep)

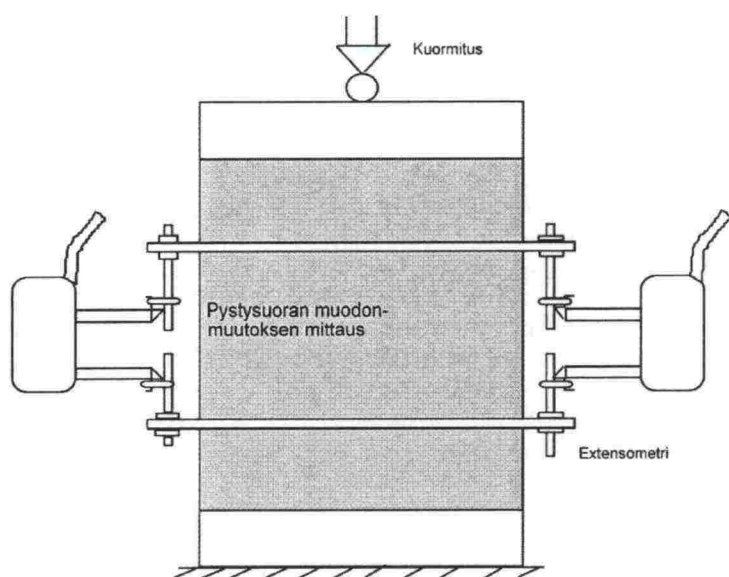
Deformaatiokestävyys tutkittiin jaksollisella virumiskokeella (dynaaminen creep prEN 12697-25A). Tutkimuksessa käytetty näytekokoo oli D= 150 mm ja h noin 155 mm. Valitun näytekokoon arvioitiin soveltuvan paremmin stabilointimassoille kuin prEN-menetelmän mukainen näytekokoo (D 150 mm, h 60 mm).

Näytteiden päätypinnat rikitettiin ennen koestusta. Kuormitusalueen läpimitta oli 150 mm. Koestus suoritettiin menetelmäkuvauksen prEN 12697-25A mukaan muilta osin paitsi, että voimaa suurennettiin siten, että pintapaineeksi tuli sama 100 kPa kuin pienellä (D 100 mm) näytteellä. Koestus keskeytettiin ennen tavoitesyklimäärää (3600 pulssia), jos näyte alkoi hajota.

Deformaatiokokeen koestuslämpötila oli 40 °C, joka on sama kuin dynaamisessa creep-kokeessa PANK- ja prEN-menetelmissä.

### 2.3.8 Jäykkyysmoduuli (1-akselinen puristuskoe)

Näytteet olivat ICT-laitteella tiivistettyjä lieriöitä (D = 150 mm, h noin 155 mm). Näytteiden ylä- ja alapohjat oli tasattu rikkilaastilla. Koestuslämpötilat olivat +5, +15 ja +25°C, kuva 1.



Kuva 1. Jäykkyysmoduulin 1-akselisen määrittyskokeen periaatekuva.

Näytettä kuormitettiin 1-akselisesti pysty akselin suunnassa (sivupaine nolla) sinimuotoisella puristusvoimapulssilla taajuudella 0,33 Hz (menetelmä Nordic SHRP Protocol: P46) ja mitattiin näytteen pystysuuntaiset muodonmuutokset näytteen keskiosasta (100 mm matkalta). Moduuli laskettiin mitatun puristusvoimapulssin ja mitattujen palautuvien aksiaalisten muodonmuutosten avulla. Jäykkyysmoduulikokeen tuloksena ilmoitetaan sekä jäykkyysmoduuli  $M_r$  että ruotsalaista FAS 454-menetelmää mukaillen korjattu jäykkyysmoduuli  $M_{rk}$ . Moduulit lasketaan kaavoilla 7 ja 8:

$$M_r = (\Delta P / A_o) / (\Delta v / H_o) \quad (7)$$

$$M_{rk} = K * H_o \quad (8)$$

missä	$M_r$ =	jäykkyysmoduuli	[MPa]
	$M_{rk}$ =	korjattu jäykkyysmoduuli	[MPa]
	$\Delta P$ =	akselialinen kuormitusmuutos	[N]
	$\Delta v$ =	akselialinen muodonmuutos, näytteen päiden väliltä/mittausväliltä	[mm]
	$A_o$ =	näytteen pinta-ala	[mm <sup>2</sup> ]
	$H_o$ =	näytteen korkeus/mittausväli	[mm]
	$K$ =	$\Delta v - \Delta \sigma_1$ havaintopisteisiin sovitetun suoran kulmakerroin	[MPa/mm]



$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon_1 &= \Delta v/H_0 && \text{kokoonpuristuman muutos} && [-] \\ \Delta\sigma_1 &= \Delta P/A_0 && \text{pystykuormituksen muutos} && [\text{MPa}]\end{aligned}$$

$M_{rk}$  määritetään sovittamalla suora  $\Delta v - \Delta\sigma_1$  -koordinaatistoon piirrettyihin havaintopisteisiin.  $M_{rk}$  on kulmakertoimen ja havaintovälin tulo. Määrittäminen voidaan tehdä myös  $\Delta\varepsilon_1 - \Delta\sigma_1$  -koordinaatistossa. Tällöin korjattu moduuli  $M_{rk}$  on suoraan kulmakerroin  $K$ .

### 2.3.9 Pakkaskestävyyskoe (jäädytys-sulatusmenetelmä)

Pakkaskestävyyskoetta varten valmistettiin stabilointimassoista lieriönäytteitä (koko D 150 mm, h = 155 mm). Osa näytteistä koestettiin (vanhennettiin) syklisellä jäädytys-sulatusrasituksella, osa niistä oli jäädytys-sulatuskoestettujen näytteiden vertailunäytteitä. Molemmissa sarjoissa tutkittiin kolme rinnakkaisnäytettä.

Stabilointien pakkaskestävyys tutkittiin betoniteollisuuden käyttämän standardin SFS 5447 mukaan. Koe on yleisessä käytössä betonin kaltaisten materiaalien pakkaskestävyyden arvioinnissa. Vastaavat standardimenetelmät ovat olemassa lähes kaikissa maissa, joissa betoni altistuu pakkasrasitukselle.

Kokeessa koekappaleisiin kohdistettiin toistuvia jäädytys- ja sulatusjaksoja. Pakkaskestävyyskokeet tehtiin pääosin jäädytys-sulatussykliä käsiohjauksella, jolloin pystyttiin tutkimaan yksi jäädytys-sulatussykli työpäivän aikana (5 sykliä/viikko). Tutkimuksen loppuvaiheen uusintakoe näytteitä tutkittaessa käytettiin laitetta automaattiohjauksella, jolloin pystyttiin tutkimaan kaksi jäädytys-sulatussykliä viikon jokaisena päivänä (14 sykliä/viikko). Jäädytys-sulatuslaitteistolla saatiin aikaan peräkkäisiä jäädytyksiä ilmassa lämpötilassa  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja sulatuksia vedessä lämpötilassa  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Jäädytys-sulatussykliä aikana tutkimusnäytteiden lämpötilan muutoksia ohjattiin jäädytys-sulatuslaitteessa olevan referenssinäytteen sisään asennetun lämpötila-anturin avulla. Lämpötilan sallittu vaihteluväli syklien aikana näytteen sisällä täytti standardin CEN/TR 15177:2006-06 vaatimukset, jotka on esitetty kuvassa 2.

Lujuuden muutos määritettiin vertaamalla jäädytys-sulatusrasituksessa olleiden koekappaleiden ja yhtä pitkän ajan (stabilointityypistä riippuvissa) varastointiolosuhteissa (RH95%) säilytettyjen, saman koostumuksen omaavien vertailukoekappaleiden lujuuksia keskenään (kriteerinä lujuuden alenema). Molemmat näytesarjat olivat saman ikäisiä ja samassa lämpö- ja kosteustilassa. Lujuuskoe oli yleensä halkaisuvetolujuuskoe vesiupotuksen ja valutuksen jälkeen koestuslämpötilassa  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Pakkaskestävyys laskettiin jäädytys-sulatusrasituksella koestettujen halkaisuvetolujuuksien keskiarvon ja vertailunäytteiden halkaisuvetolujuuksien keskiarvon suhteen perusteella kaavasta 9.

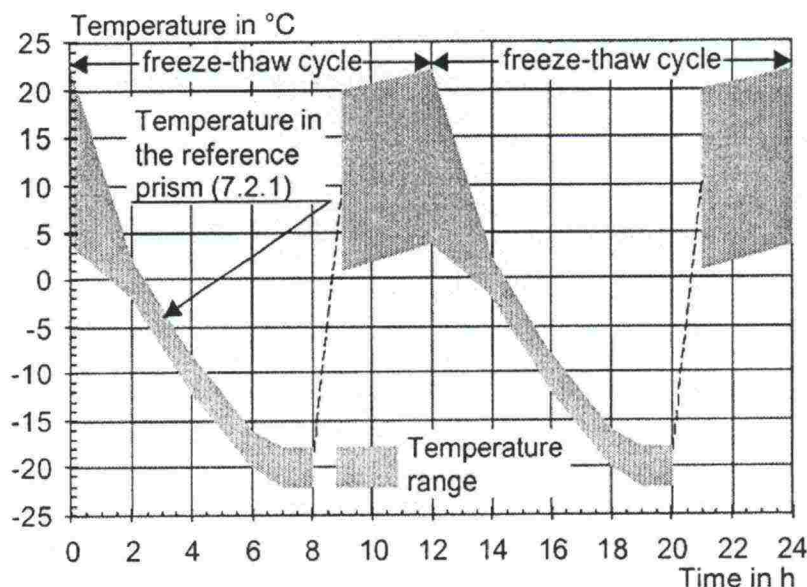
$$\text{Pakkaskestävyys } [\%] = 100 \times \frac{\sigma_{\text{jäädytys-sulatusnäytteet}}}{\sigma_{\text{vertailunäytteet}}} \quad (9)$$

jossa

$\sigma_{\text{jäädytys-sulatusnäytteet}}$  = jäädytys-sulatussykleillä koestettujen näytteiden halkaisuvetolujuuksien keskiarvo [kPa],



$\sigma_{\text{vertailuäytteet}}$  = vertailunäytteiden halkaisuvetolujuuksien keskiarvo [kPa].



Kuva 2. Jäädytys-sulatuskokeen näytteiden lämpötilan sallittu vaihteluväli syklien aikana (viite: menetelmä CEN/TR 15177:2006-06).

### 2.3.10 Suola-pakkaskestävyyskoe

Stabilointinäytteiden suola-pakkaskestävyyskoe poikkesi kohdan 2.3.9 mukaisesta jäädytys-sulatuskokeesta siten, että suola-pakkaskestävyyskoeksessa käytettiin sulatussykliä aikana 1-prosentista NaCl-liuosta veden asemasta.

### 2.3.11 Imupainekoe (TS-testi)

Imupainekokeella pyrittiin selvittämään pienin lisäbitumipitoisuus, joka tarvitaan sitomaan stabilointimassanäytteen hienoaines. Menetelmä on kuvattu lyhyesti vuoden 2002 Stabilointiohjeessa [1], varsinaista menetelmäkuvausta siitä ei ollut tutkimuksen suoritusajana käytettävissä.

Tutkittavasta sidotusta stabilointimateriaalista (REST-massa, rakeisuusvaihtoehto B, rouhepitoisuus 50 %, tavoitevesipitoisuus) valmistettiin kiertotiivistimellä näytteitä, joiden läpimitta on 150 mm ja korkeus noin 100 mm. Massa sekoitettiin laboratoriosekoittimella kussakin jäännösbitumipitoisuudessa, jonka jälkeen massa tiivistetään kiertotiivistimen avulla tavoitettavuuteen.

Tiivistämisen jälkeen näytteet tuetaan noin 30-40 mm näytekorkeutta korkeampiin muoviputkiin, joiden sisähalkaisija on noin 150 mm ja seinämä on sahattu sirkkelillä yhdestä kohdasta korkeussuuntaan halki. Putken pohjalle asetettiin reiällinen kansi ja putket puristettiin näytteiden ympärille putkiliittimillä. Sen jälkeen putkinäytteet asetettiin lämpökaappiin kuivumaan 40 °C:n lämpötilaan. Näytteiden arvioitiin olevan kuivia, kun niiden massa ei enää huomattavasti muuttunut.

Kuivatuksen jälkeen näytteiden annettiin tasaantua huoneenlämmössä 2 vrk. Lämmön tasaantumisen jälkeen näytteet asetettiin vaakasuoralla alustalla olevaan altaaseen, jonka pohjalla on ionisoitua vettä. Näytteiden alapää oli vedessä noin 20 mm syvyydessä. Näytteiden päälle asetettiin kumimatto, joka esti niihin imeytyvän veden kuivumisen kokeen aikana.

Veden imeytymistä näytteisiin seurattiin dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusmittausten sekä punnitusten perusteella. Mittauksia oli tarkoitus jatkaa, kunnes dielektrisyys ja sähkönjohtavuus muuttuisivat merkittävästi tai kuitenkin enintään 14 vrk.

Dielektrisyysvakio ja sähkönjohtavuus mitattiin näytteiden yläpinnasta useasta kohdasta käyttäen Percometer-näyttölaitetta ja siihen liitettyä mittausanturia 012 SF laitteen käyttöohjetta noudattaen.

Ensimmäisen kerran dielektrisyiden ja sähkönjohtavuuden mittaus suoritettiin ennen näytteiden vesiastiaan asettamista, sen jälkeen 0,5 h, 2h, 4 h ja 6 h kuluttua ja sen jälkeen aamuisin, kunnes mittauksia oli 14 vrk ajalta.

### 3 TULOKSET

#### 3.1 Esikokeet

Stabilointien kehittämistutkimuksen lähtökohtana oli selvittää bitumia sisältävien kerrostabilointien ominaisuudet nykyisin muiden materiaalien tutkimuksissa käytössä olevilla menetelmillä (esim. PANK, SFS tai SFS-EN) ja kehittää samalla sekä menetelmiä, stabilointimateriaaleja että niiden rakentamiskäytäntöä. Koska nämä menetelmät on kehitetty muille materiaaleille (esim. kulutuskerrosmasseille tai betonituotteille), eivät ne kaikilta osin sovellu kovin hyvin stabilointien tutkimiseen.

Tutkimukset jakaantuivat kahteen vaiheeseen:

- esikoevaiheessa kehitettiin stabilointien laboratoriotutkimusmenetelmiä ja stabilointien referenssimassojen koostumukset myöhempiä tutkimuksia varten,
- toiminnallisten ominaisuuksien tutkimuksissa selvitettiin stabilointien toiminnalliset ominaisuudet käyttäen esikokeissa kehitettyjä materiaaleja ja valittuja menetelmiä.

##### 3.1.1 Hienoaineksen valintakokeet

Rakeisuusvaihtoehdoissa B ja C (liite1) käytettiin hienoainesseosvaihtoehtoa 1 (Teiskon tyyppinen hienoaines) ja rakeisuusvaihtoehdon A mukaiseen kiviainekseen lisättiin hienoainesta, jonka avulla pyrittiin heikentämään (hallitulla ja toistettavissa olevalla tavalla) massan hienoaineksen ominaisuuksia.

Tutkittavat hienoainesseosvaihtoehdot olivat:

- Normaali, koko hienoaines granodioriittia (Seos 1 Teisko),
- Kiillelisäys, kokonaiskiillemäärä 25 % hienoaineksesta (Seos 2 kiilteinen),
- Kaoliini ja kiillelisäys, kokonaiskiillemäärä 20 % ja kaoliinilisäys sellainen, että hienoaineksen ominaispinta-alaksi tulee noin 5 m<sup>2</sup> / g (Seos 3 savi-nen),
- alkuvaiheessa mukana oli myös neljäs hienoainesseos, joka sisälsi 35 %, kalimaasälpää, mutta sen käytöstä luovuttiin, koska se vastasi mineraalikoostumukseltaan varsin hyvin seosta 1.

Kiillepitoisella hienoaineksella oli tarkoitus heikentää massan lujuutta, kalimaasälpäisyyksellä heikentää tartuntaa ja kaoliini+kiillelisäyksellä lisätä ominaispinta-alaa (tavoite noin 5 m<sup>2</sup> / g). Hienoainesten ominaisuudet on esitetty taulukossa 6.

Käytettävä hienoainesseos valittiin VBST-massan vedenkestävyyden perusteella.

Taulukko 6. Hienoainesten ominaisuudet.

	Ominais- pinta-ala	Veden adsorptio	Rakeisuus (seulojen läpäisy-%)					Tiheys
			0,0006	0,002	0,006	0,02	0,063	
Kiviaines	m <sup>2</sup> / g	%	0,0006	0,002	0,006	0,02	0,063	kg/m <sup>3</sup>
Granodioriitti	1,76	1,08	0	3	7	19	n. 37	2648
Kvartsi	0,75	0,24	0	5	17	47	n. 88	2643
Kalimaasälpä	1,79	1,39	0	9	30	70	100	2624
Kiille	1,42	1,96	0	9	15	48	n. 90	2858
Kaoliini	9,93	10,94	30	52	91	100	-	2586



Taulukossa 7 on esitetty tutkittavien hienoainesseosvaihtoehtojen (1, 2 ja 3) mineraalikoostumukset ja taulukossa 8 niistä yhdistetyt hienoainesseokset.

*Taulukko 7: Valittujen hienoainesseosten mineraalipitoisuudet*

Mineraali	Pitoisuus		
	Seos 1	Seos 2	Seos 3
	%	%	%
kvartsi	55,8	45,5	22,3
plagioklaasi	22,2	18,1	8,9
kalimaasälpä	14,1	11,5	5,6
kiille	8,0	25,0	20,0
kaoliini			43,2
YHT	100	100	100

Seos 1 = Teiskon tyyppinen hienoaines

Seos 2 = Kiillepitoinen hienoaines

Seos 3 = Savipitoinen hienoaines

*Taulukko 8. Osa-aineista yhdistettyjen hienoainesseosten koostumus\*).*

	Koostumus				YHT
	FFF K6	FFQ	Flogobiitti	Kaoliini	
	200 M	200 M	kiille	savi	
	%	%	%	%	%
Seos 1	37	55	8		100
Seos 2	30	45	25		100
Seos 3	15	22	20	43	100

\*) FF K6 ja FFQ ovat SP Minerals Oy:n kvartsimineraalien tuotemerkkejä.

Teiskon murskeen (raekoostumusten A-C) sisältämästä hienoaineksesta ja erikseen lisätyistä hienoainesseoksista muodostui seoksia joiden tyhjätilat on esitetty taulukossa 9. Rakeisuus A ja B erikseen lisättävän hienoainesseoksella "Seos 1 Teisko" kanssa täyttivät Stabilointiohjeen hienoaineksen tyhjätilasuosituksen (35-40 %). Rakeisuus A + "Seos 2 kiilteinen" oli suositusrajalla. Rakeisuus A + "Seos 3 savinen" ylitti olennaisesti hienoaineksen tyhjätilasuosituksen.

Taulukko 9. Hienoainesseosten tyhjätila.

Hienoaines- seos	Seos- tyyppi	Hienoaineksen tyhjätila	Poikkeama suosituksesta	Suositus (Stab.ohje)
		%	%	%
A1	Teisko	40	ok	35-40
A2	Kiilteinen	41	ylitys 1 %-yks	
A3	Savinen	45	ylitys 5 %-yks	
B1	Teisko	39	ok	
C1	Teisko	41	ylitys 1 %-yks	

Osa-ainesten ominaisuuksien perusteella laskettiin yhdistetyn hienoainesseoksen ominaispinta-ala ja veden adsorptio. Savista erikseen lisättävää hienoainesta sisältävä seos A3 omaa muita korkeamman ominaispinta-alan, veden adsorption ja hydrofiilisyyden, koska hienoainesseosvaihtoehto 3 sisältää runsaasti savimineraalia.

Asfalttinormien 2000 taulukon 11 mukaan asfalttimassan hienoainesseosten tulee täyttää seuraavat laatuvaatimukset:

- Raekoko < 0,002 mm ≤10 massa-%
- Tyhjätila 30-45 %
- Ominaispinta-ala 1,0-5,0 m<sup>2</sup>/g.

Ennakkokokeella selvitettiin, missä järjestyksessä hienoaines tulisi lisätä muuhun kiviainekseen. Tätä tarkoitusta varten tehtiin sekoituskokeita käyttäen kolmea eri sekoitustapaa, jotka olivat:

- Sekoitettiin ensin hienoainesseos (huonekosteudessa), sekoitettiin se muun kiviaineksen kanssa,
- Sekoitettiin ensin hienoainekset keskenään, sitten ne sekoitettiin kiven alle 2 mm aineksen kanssa ja sen jälkeen tämä seos sekoitettiin muuhun kiviainekseen,
- Sekoitettiin ensin hienoaineseos, joka kuivattiin uunissa ja jauhettiin. Sen jälkeen se sekoitettiin muuhun kiviainekseen.

Näitä hienoaineksen sekoitustapaversioita käyttäen valmistettiin VBST-koemassat. Niistä määritetyt halkaisuvetolujuus- ja halkaisuvetojäykkyydet on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Hienoaineksen lisäystavan vaikutus VBST-massan lujuuteen ja jäykkyyteen (Rakeisuus B, ikä 4d, T 10 °C).

	Halkaisuveto- lujuus [kPa]	Halkaisuveto- jäykkyys [MPa]
Versio 1	231,5	33,5
Versio 2	226,9	31,3
Versio 3	232,7	31,8

Hienoaineksen sekoitustapojen eroilla ei ollut merkittävää vaikutusta VBST-massan halkaisuvetolujuuteen tai halkaisuvetojäykkyyteen. Tästä syystä myöhemmin suoritettavaan näytevalmistukseen valittiin sekoitustapa 1.

Hienoainesseoksen valinnan perusteeksi tehtiin vedenkestävyysskojeita ko-keillen eri hienoaineseosvaihtoehtoja. Hienoaineseosvaihtoehdon vaikutus vedenkestävyyteen on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Hienoainesseosvaihtoehdon 1 – 3 vaikutus VBST-massan vedenkestävyyteen (rakeisuus A, bitumi B160/220)

			A1	A2	A3
Halkaisuvetoluj.	Märkä, ka	kPa	263	302	249
	Kuiva, ka	kPa	759	704	764
	Muutos, ka	kPa	-496	-401	-515
	Muutos, ka	%	-65	-57	-67
	Tarttuvuusluku (vedenkesto)	%	35	43	33
Halkaisuvetojäykk.	Märkä, ka	MPa	30	35	28
	Kuiva, ka	MPa	88	79	96
	Muutos, ka	MPa	-58	-44	-68
	Muutos, ka	%	-66	-56	-71

Yhteenvedona rakeisuuden A hienoainesseoksen valintakokeista voidaan todeta, että hienoainesvaihtoehtoon "Seos 1 Teisko" verrattuna oli kiilteisellä ja savisella vaihtoehdolla vain vähän vaikutusta halkaisuvetolujuuteen tai vedenkestävyyteen. Savinen hienoaines todettiin laboratorio-olosuhteissa vaikeasti käsiteltäväksi suuren hygroskooppisuutensa vuoksi.

Tarvittaessa erikseen lisättäväksi täytejauheeksi valittiin "Seos 1 Teisko". Sen raaka-aineina käytetyt kvartsimineraalit FFF K6 ja FFQ toimitti SP Minerals Oy ja flogobiitti-kiilteen Kemiran Siilinjärven tehdas.

### 3.1.2 Kosteus- ja tiiveysmääritykset

#### 3.1.2.1 Yleistä

Stabilointimassaa valmistettaessa käytetään yleensä kylmätekniikkaa ja kostea kiviainesta. Kiviaineksen kosteus ja massan tiiviys vaikuttavat merkittävästi stabiloinnin toiminnallisiin ominaisuuksiin. Kiviaineksen tiivistyksen kannalta optimaalinen vesipitoisuus ja tavoitettiiveys määritetään Stabilointiohjeen [1] mukaan parannetulla Proctor-kokeella (menetelmä SFS-EN 13286-2).

Stabilointiohjeen mukaan suhteitusnäytteiden vesipitoisuutena käytetään parannetun Proctor-kokeen optimivesipitoisuutta ja tiiveysasteena 95 % parannetusta Proctor-tiiveydestä. Proctor-koe tehdään kuitenkin yleensä ilman bitumia. Koska massa sisältää tiivistyshetkellä nestemäisinä komponentteina sekä vettä että bitumia, saattaa Stabilointiohjeen suositus johtaa liian vesipitoisiin massoihin erityisesti, jos käytetään emulsiota. Tästä syystä on yleinen tapa käyttää massan tiivistyshetken kosteutena vesipitoisuutta, joka saadaan vähentämällä kiviaineksen optimivesipitoisuudesta ja lisäbitumipitoisuus ja mahdollisen emulsion sisältämä vesi.

Kun stabiloidaan tien rakenteessa tai ulkona varastoitua kiviainesta, se sisältää aina jonkin verran kosteutta. Tämä vesipitoisuus on kokemuseräisen tiedon mukaan yleensä suuruusluokkaa 2,5 – 3 %.



### 3.1.2.2 Proctor-tulokset

Kiviaineksen ja massan sisältämien muiden kuiva-ainesten optimikosteus ja maksimikuivatilavuuspaino määritettiin parannetulla Proctor-kokeella (SFS-EN 13286-2) taulukon 12 mukaisille kiviainesten ohjerakeisuuksille A –C. Näytteen läpimitta oli 152 mm. Proctor-kokeissa massa ei sisältänyt lisäbitumia. REST-massojen rakeisuuden ja KOST-massojen rakeisuuden ja sementtipitoisuuden vaikutus optimivesipitoisuuteen ja maksimikuivairtiheyteen arvioitiin taulukon 12 tulosten perusteella.

*Taulukko 12. Proctor-kokeiden optimivesipitoisuus- ja maksimikuivairtiheystutkimustuloksia (SFS-EN 13286-2).*

Rakeisuus	Optimi- vesipit.	Maksimi- kuivairtiheys
	%	kg/m <sup>3</sup>
	Proctor-koetuloksia	
A1	7,42	2197
A2	7,54	2179
A3	6,93	2187
<b>B</b>	<b>6,19</b>	<b>2257</b>
C	6,42	2133
B+2% sem	6,46	2311
B+25% PAB-rouhe	5,57	2237
B+50% RC lämmin	5,57	2182

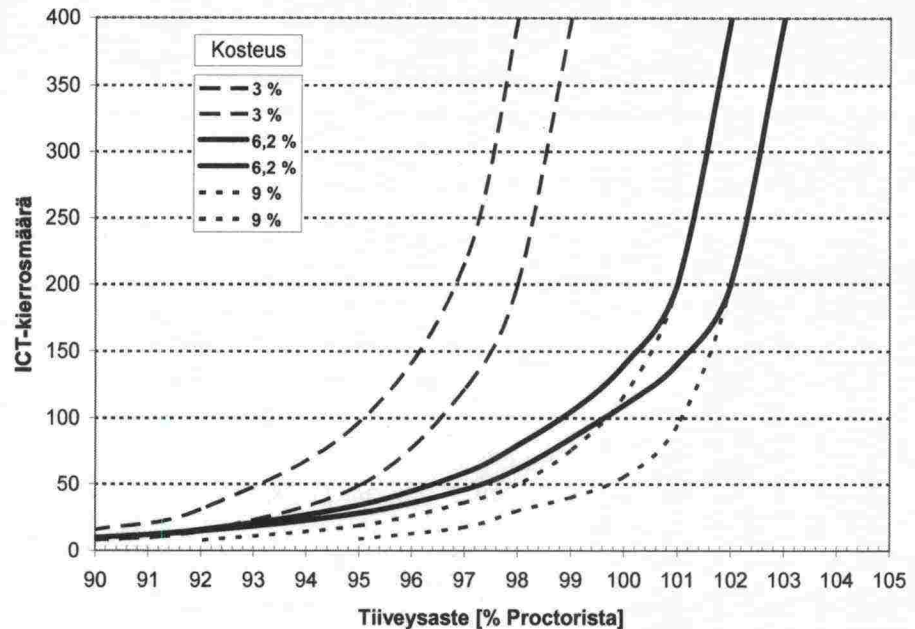
### 3.1.2.3 Kosteus- ja tiheysmääritykset kiertotiivistimellä

Mahdollisuutta korvata Proctor-koe kiertotiivistimellä optimikosteuden ja näytteiden tavoitettavuuden valintakokeissa selvitettiin tutkimuksen alkuvaiheissa suppealla koesarjalla, jossa tiivistettiin kolmessa eri kosteustilassa (3 %, 6,2 % ja 9 %) olevaa, kiviainekoostumuksen B omaavia näytteitä kiertotiivistimellä (ICT-150RB). Aiemmin tehdyn Proctor-kokeen mukaan materiaalin optimikosteus oli 6,2 % ja maksimikuivairtiheys 2257 kg/m<sup>3</sup>.

#### Näytteen kuivairtiheystavoitteen määrittäminen ICT:llä

ICT-näytteiden läpimitta oli 150 mm, tiivistystyömäärä oli 400 kierrosta ja rinnakkaisnäytteitä tehtiin kaksi kpl/koostumus. Tiivistämisen aikana ICT:n asetusparametrit olivat CEN:n ohjeen mukaiset: paine näytteen pinnassa 600 kPa, kulma 17,5 mrad (1 °), nopeus 30 kierrosta/min.

Kuvassa 3 on esitetty kokeiden tuloksena näytteen eri tiiviyksasteiden edellyttämä kierrosmäärä.



Kuva 3. Eri tiiveysasteiden saavuttamisen edellyttämä ICT-kierrosmäärä (0...400 r).

Tiivistyskokeissa (ilman bitumia tehdyissä) saatiin tulokseksi:

- ICT:llä saavutettiin tavoitetiiveys (95 % Proctor-tiiveydestä) kaikilla näytteillä alle 100:lla kierroksella,
- ICT pystyi tiivistämään optimikosteutta merkittävästi kuivemmankin kiviainesnäytteen (kosteus 3 %) kierrosmäärällä 400 noin 98 - 99 %:iin Proctor-tiiveydestä,
- Kuvan 3 mukaan optimikosteudessa (6,2 %) ollut ja sitä huomattavasti kosteampi kiviaines (9 %) saavuttivat saman tiiveyden jo noin 200 tiivistyskierroksen jälkeen, jolloin molempien tiiveys oli 101-102 % Proctor-tiiveydestä. Kun kierrosmäärä oli 400, näytteiden tiiveys oli 102 - 103 % Proctorista,
- Tässä kokeessa 95 % ICT-näytteen tiiveydestä 200 kierroksen jälkeen vastasi 1-2 %-yksikön tarkkuudella Proctor-näytteen tiiveysastetta 95 % Proctor-tiiveydestä, kun näytteen kosteus oli 6,2 -9,0 %.
- kun näytteen kosteus oli 6,2 %, tiiveysastetta 96 % (ICT:n kierrosmäärää 200 r vastaavasta näytteen kuivairtotiheydestä) vastasi tiheys 2189 kg/m<sup>3</sup>, joka oli noin 2 % korkeampi kuin 95% Proctor-tiiveydestä (2144 kg/m<sup>3</sup>).

Tehdyn kokeen perusteella todettiin, että käyttökelpoinen ICT-laitteeseen perustuva menetelmä stabilointimassanäytteiden (D 150 mm) tiivistämiseksi tavoitetiiveyteen on seuraava:

- tiivistetään ensin valitun kosteuspitoisuuden omaavia massanäytteitä (3 rinnakkaisnäytettä) kierrosmäärällä 200 r ja määritetään näin tiivistettyjen näytteiden kuivairtotiheys,
- tiivistetään sen jälkeen tutkimusnäytteet kuivairtotiheyteen, joka vastaa 96 % 200 r tiivistettyjen näytteiden tiheydestä.



Tämä menetelmä on yhdenmukainen norjalaisessa käsikirjassa [7] annettujen stabilointimassanäytteiden (D 100 mm) tiivistysohjeiden kanssa.

Tämä ICT-laitteen tuloksiin perustuva laboratorioissa valmistettujen stabilointimassanäytteiden tavoitetiiveyden valintamenetelmä otettiin projektin aikana käyttöön vaihtoehtona Proctor-menetelmään (SFS-EN 13286-2) perustuvalle tavoitetiiveyden valintamenetelmälle. Viimeksi mainitussa tavoitetiiveys oli 95 % Proctor-kokeen perusteella määritetystä maksimikuivairtitiheydestä.

### Optimivesipitoisuusmäärittäminen ICT:llä

Optimikosteuden määrittämiseksi ICT:n avulla tehtiin koesarja, jossa tiivistettiin rakeisuuden B omaavaa kiviainesnäytettä CEN-asetuksin 50 kierrosta. Näytteeseen lisättyjä vesipitoisuusvaihtoehtoja oli 4 kpl (3%, 5%, 7% ja 9%). Tiivistystyön aikana tehtiin havainnot veden poistumisesta ICT-näytteestä (kierrosmäärän funktiona), taulukko 13.

Tiivistämisen jälkeen määritettiin näytteeseen jäänyt vesipitoisuus kuivaamalla näyte uunissa.

Tuloksena todettiin:

- paras tiiveys saavutettiin, kun näytteeseen lisätty kosteus oli 7 % ja näytteeseen jäänyt kosteus 5,9 %.
- Tällöin vettä alkoi 50 r kierrosmäärän kohdalla valua ulos näytteestä ja näytteen tiheys oli noin 2 % alle Proctor-kokeen mukaisen maksimikuivairtitiheyden.
- Näytteen optimikosteus oli kuvan 4 perusteella noin 6,0 %. Tuloksia on mahdollisuus tarkentaa tihentämällä koesarjaa (lisätty vesipitoisuus 1 %-yksikön välein).

*Taulukko 13. Optimivesipitoisuuden määrittäminen ICT:llä (Teiskon granodioriitti, rakeisuus B, ICT-kierrosmäärä 50 r).*

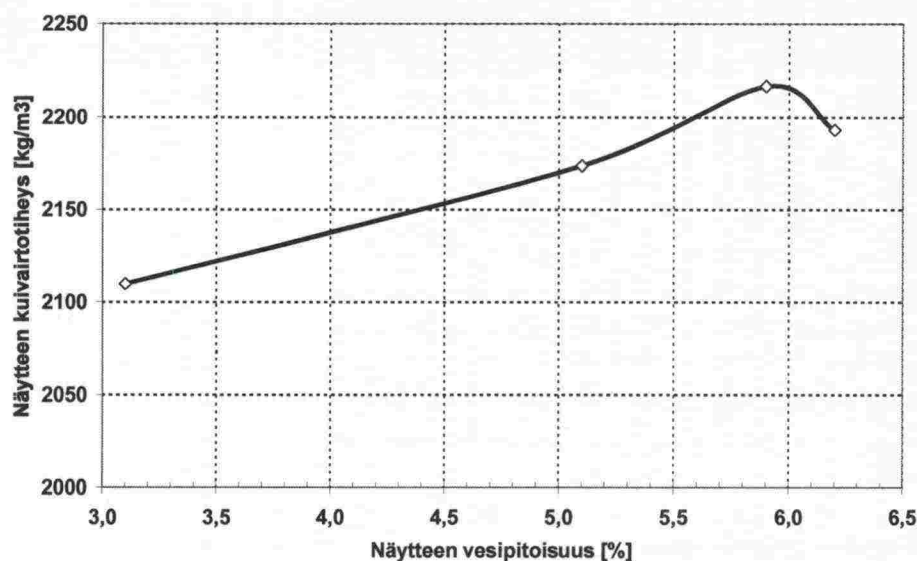
Lisätty kosteus %	Kuiva-irtotiheys kg/m <sup>3</sup>	Tiiveys % Proctorista	Veden valuminen (kierrosmäärä, millä vesi tuli läpi)	Näytteeseen jäänyt kosteus %
3,0	2110	93,5	ei tullut läpi (< 50 r)	3,1
5,0	2174	96,3	ei tullut läpi (< 50 r)	5,1
7,0	2217	98,2	alkoi juuri tulemaan läpi eli n. 50 r	5,9
9,0	2193	97,2	n. 15 r kohdalla vettä tuli jo läpi	6,2

Taulukon 13 ja kuvan 4 mukaisia tuloksia käytettiin vain optimivesipitoisuuden määrittämiseen. Niissä esitetyt kuivairtitiheydet vastaavat kierrosmäärää 50 r.

Edelleen on syytä todeta, että myös tutkimusnäytteitä valmistettaessa tavoitetiiveys saavutetaan suhteellisen alhaisella kierrosmäärällä. Näytettä ei tule tiivistää liikaa. Liiallinen tiivistys voi lujittaa näytettä (tiiviimpi näyte on lujempi) tai se voi myös heikentää näytettä, jos kiviä rikkoontuu tai sideainetta huuhtoutuu veden mukana pois massasta.

Edellä olevan perusteella ICT:n avulla voitiin määrittää sekä kiviaineksen kuivairtitiheys että optimivesipitoisuus, jotka olivat lähellä Proctor-kokeen mukaista maksimikuivairtitiheyttä ja optimivesipitoisuutta. Aineiston pienuudesta johtuen kokeen tulos on suuntaa-antava.





Kuva 4. ICT:llä tiivistetyn murskenäytteen kuivairtoheiden riippuvuus jäännösvesipitoisuudesta (Teiskon granodioriitti, rakeisuus B).

### 3.1.3 Näytteiden tiivistysmenetelmän valinta

Esikokeiden perusteella valittujen suhteituskoenäytteiden ja toiminnallisten ominaisuuksien tutkimusnäytteiden valmistusperiaatteisiin kuului näytteiden tavoitekostisuuden ja tavoitetiiveyden valinta Proctor-kokeiden perusteella. Kaikille koostumuksille ei tehty Proctor-kokeita, vaan osalle koostumuksista tavoitetiiveys arvioitiin muiden koostumusten tulosten perusteella.

Proctor-kokeet tehtiin ilman massaan lisättävää uutta bitumia. Sen sijaan Proctor-kokeissa saattoi olla massan joukossa asfalttirouhetta. Remix-stabiloinnissa rouhe oli lämmitettyä ja VBST-stabiloinnissa huoneenlämpötilassa. Kun näytevalmistusta varten valittiin stabilointimassan tavoitekosteus, oletettiin lisäbitumin korvaavan tiivistyshetkellä (massan tiivistyksen kannalta) saman verran optimikosteuteen sisältyvää vettä.

$$w_{\text{näyte}} = w_{\text{Proct.opt}} - p_{\text{bit}} \quad (9)$$

jossa

$w_{\text{näyte}}$  = massan vesipitoisuus valmistushetkellä [%]

$w_{\text{Proct.opt}}$  = ilman lisäbitumia määritetty Proctor-menetelmän optimikosteus [%]

$p_{\text{bit}}$  = massan lisäbitumipitoisuus.

Näytteet tuli tiivistää kiertotiivistimellä Proctor-kokeiden perusteella valittuun tavoitetiiveyteen (perusvaihtoehto 95 % parannetusta Proctor-tiiveydestä).

Projektin aikana päätettiin vaihtaa näytteiden tavoitetiiveyden valintamenetelmää. Proctor-menetelmästä luovuttiin tavoitetiiveyden valintaperusteena ja siirryttiin käyttämään kiertotiivistintä tähän tarkoitukseen. Kun tavoitetiiveyskokeet tehtiin kiertotiivistimellä, voitiin tiivistyskokeissa käyttää ongelmitta myös bitumista sideainetta, jolloin massan koostumus vastasi paremmin tutkimusnäytteiden massan koostumusta. Tiivistyskokeiden ja tutkimusnäytteiden näytevalmistuksen tiivistysmenetelmäerot poistuivat (Proctor tiivisti eri periaatteella kuin ICT).

Kiertotiivistimen avulla näytteiden (D 150 mm, h noin 155 mm) tavoitetiiveys valittiin seuraavasti:

- rinnakkaisnäytteet valmistettiin joko ison sekoittimen noin 30 kg sekoitusannoksesta peräkkäin tai pienen sekoittimen annoksesta yksi näyte kerrallaan. VBST-näytteiden valmistus edellytti isompaa annosta vaahdotusteknisistä syistä. Sen sijaan REST-näytteille, jossa lisäbitumi oli emulsio- muodossa, soveltui valmistus yksi näyte kerrallaan,
- ensin tiivistettiin kolme rinnakkaisnäytettä vakiotiivistystyömäärällä 200 r kiertotiivistimen CEN-asetuksin,
- tutkimusnäytteiden tiiveystavoitteeksi valittiin 96 % 200 r tiivistetyn näytteen tiiveydestä.

Kun useita vaahdotettua bitumia sisältäviä VBST- ja KOST-näytteitä tiivistettiin samasta sekoitusannoksesta vakiotiivistystyömäärällä, kolmas näyte ei tiivistynyt yleensä yhtä hyvin kuin kaksi ensimmäistä. Tästä syystä VBST- ja KOST-näytteiden tiiveystavoitteeksi valittiin 96 % rinnakkaisnäytesarjan kahden ensimmäisen näytteen kierrosmäärää 200 r vastavasta tiiveydestä. REST- massoille tiiveystavoite oli 96 % kolmen rinnakkaisnäytteen sarjan tiiveyskeskiarvosta.

### 3.1.4 Bitumin vaahdotuskokeet

#### 3.1.4.1 Yleistä

Vaahdotusbitumistabilointimassaa valmistettaessa bituminen sideaine vaahdotettiin välittömästi ennen sen lisäystä asfalttisekoittimessa olevien kiviainesten joukkoon.

Bitumin vaahdotumista kuvataan kahdella tunnusluvulla, jotka ovat tilavuuden laajenemiskerroin ja vaahdon maksimitilavuuden puoliintumisaika. Tilavuuden laajenemiskerroin on vaahdon tilavuuden suhde alkuperäisen bitumin tilavuuteen. Vaahdon puoliintumisaika on aika, mikä kuluu vaahdon maksimitilavuuden puoliintumiseen.

Stabilointiohjeen 2002 [1] ohjearvot vaahdotetun bitumin ominaisuuksille ovat seuraavat:

Tilavuuden laajenemiskerroin	$\geq 15$ (eli vaahtoa vähintään 15 kertaa bitumin tilavuus)
Vaahdon puoliintumisaika	$\geq 25$ s (maksimitilavuuden puoliintuminen kestää yli 25 s).
Bitumin vaahdotuslämpötila	$\geq 140$ °C (pehmeämmillä laaduilla), kuten B650/900 $\geq 130$ °C)
	HUOM. Tämä vaahdotuslämpötila todettiin tehdyissä kokeissa liian alhaiseksi, ks. kohta 3.1.4.3.
Vaahdon vesipitoisuus	2 – 3 % bitumin määrästä.



Bitumi vaahdotetaan työmaalla erityisessä vaahdotuslaitteessa, jolla vaahto saadaan aikaan ruiskuttamalla pieni määrä vettä kuumaan bitumiin laajenemiskammiossa. Niin kauan kuin bitumi on vaahtomaisessa muodossa (noin 20 s ajan), bitumilla on alhainen viskositeetti ja se pystytään sekoittamaan kiviainekseen ympäristön lämpötilassa ja työmaan kosteusolosuhteissa.

### 3.1.4.2 Vaahdotuskokeen suoritus

Ennen VBST-massan tutkimusnäytteiden valmistusta tehtiin laboratoriossa bitumin vaahdotuskokeita, joissa määritettiin kokeellisesti käytettävien bitumilajien tilavuuden laajenemiskerroin ja vaahdon maksimitilavuuden puoliintumisaika.

Massan valmistuksessa käytettiin vaahdotettua bitumia ja Teiskon kiviainesta. Massakokeissa käytettiin bitumin lisäaineena tartuketta, ellei toisin ole ilmoitettu:

Kiviaines:	Teisko KaM 0/22 mm, rakeisuuskäyrä B, liite 3
Täytejauhe:	Seos 1 "Teisko"
Bitumit:	B160/220, lisäksi B 70/100 ja B 650/900
bitumipitoisuus:	4,0 %
Tartuke:	0,5 % Raisamin DT, ellei toisin ole ilmoitettu.

Kokeessa vertailtiin kahta vaahdotusmenetelmää:

- bitumin vaahdotus avoimessa astiassa käsityökaluin sekoituskoneella,
- bitumin vaahdotus automaattisella vaahdotuslaitteella (valmistaja Andament Oy).

Vaahdotuksessa kokeiltiin bitumin lämpötiloja 160 – 190 °C ja vesipitoisuuksia 1,5 – 2,5 %.

Kummallakin vaahdotusmenetelmällä valmistettua vaahtobitumia käyttäen valmistettiin massanäytteitä. Massa sekoitettiin laboratoriosekoittimessa (annoskoko 30 kg).

Avoimessa astiassa vaahdotettu bitumiannos kaadettiin käynnissä olevaan sekoittimeen kiviainesten päälle välittömästi vaahdotuksen jälkeen.

Vaahdotuslaitteella vaahdotettu bitumi ruiskutettiin käynnissä olevaan sekoittimeen kiviainesten päälle välittömästi vaahdotuksen jälkeen sitä mukaa kuin vaahtoa muodostui.

Koemassanäytteet tiivistettiin isolla kiertotiivistimellä samaan 95 % Proctor-tiiveyteen (D =150 mm, h noin 150 mm).

Märkinä koestettuja näytteitä säilytettiin kuivassa huoneilmassa rutilän päällä 7 d ja sen jälkeen vedessä 3 d ajan, minkä jälkeen niistä tutkittiin halkaisuvelolujuus.



### 3.1.4.3 Vaahdotustulokset

#### Vaahdotus avoimessa astiassa (bitumi B160/220)

Ilman tartuketta bitumilla B160/220 avoimessa astiassa tehtyjen vaahdotuskokeiden tulosten mukaan:

- paras vaahtoaminen saavutettiin, kun bitumin lämpötila ennen veden lisäystä oli 170 °C ja vesipitoisuus oli 2,5 % bitumin määrästä,
- vaahtoutuminen oli parhaimmillaan yli 13-kertaista, minkä jälkeen vaahto tulvi mittaustastian laitojen yli ja määrä olisi noussut vielä suuremmaksi. Vaahdon puoliintumisaika oli parhaimmillaan noin 60 s.

#### Vaahdotus avoimessa astiassa (bitumi B 70/90 ja B 650/900)

Tulosten mukaan näille bitumeille soveltui vaahdotuslämpötila (170 °C), jolla saavutettiin 17-kertainen maksimitilavuus ja 83-116 s pituinen puoliintumisaika, kun vesipitoisuus oli 2,5 %.

#### Vaahdotus vaahdotuslaitteella (bitumi B160/220)

Vaahdotuslaitteella (ilman tartuketta) saavutettiin useissa toistokokeissa noin 15-20-kertainen vaahdon maksimitilavuus. Sitä vastasi noin 20 s vaahdon puoliintumisaika. Tartukkeen käyttö ei parantanut vaahtoutumisominaisuuksia.

#### Massan peittoaste

Vaahdotusbitumimassan peittoaste tutkittiin välittömästi massan sekoituksen jälkeen muottilaatikkoon kaadetusta tiivistämättömästä stabilointimassasta silmä määräisesti. Molemmilla vaahdotusmenetelmillä vaahdotettua bitumia käyttäen valmistettujen massojen isommat kiviainesrakeet olivat lähes paljaat. Vaahdotusmenetelmien välillä ei todettu eroja vaikutuksessa peittoasteeseen.

#### Halkaisuvetolujuudet

Kokeilun yhteydessä valmistettujen vaahtobitumistabilointimassanäytteiden halkaisuvetolujuudet olivat molemmilla menetelmillä parhaimmillaan noin 360 kPa (märät näytteet). Vaahdotettaessa oli bitumin lämpötila noin 170 °C ja vaahdon vesipitoisuus noin 2,5 % bitumin määrästä.

Yhteenvetona vaahdotuskokeen tuloksista voidaan todeta, että molemmilla menetelmillä bitumi pystyttiin vaahdottamaan. Vaahdotusmenetelmillä ei todettu eroja massan peittoasteessa ja molemmilla vaahdotusmenetelmillä saavutettiin yhtä suuret massan lujuusarvot.

Vaahdotuslaitteen etu on, että sen toimintaperiaate jäljittelee työmaalla käytettävän vaahdotuslaitteen toimintaperiaatetta. Bitumin vaahdotus sujui tehokkaasti ja bitumin ruiskutus massa-annokseen toimi hyvin. Bitumi- ja vesisuuttimien läpi kulkevat virtaukset säätivät bitumin ja veden seossuhteen. Vaahdon puoliintumisaika jäi suhteellisen alhaiseksi. Vaahto pystytään ruiskuttamaan nopeasti ja sekoittamaan tehokkaasti massa-annokseen. Näytevalmistuksen seossuhteet riippuvat laitteen säädöistä, paineista ja asetuksista, joiden tulee olla kohdallaan, jotta massan koostumus on suunnitellun mukainen.

Molemmilla menetelmillä valmistettujen massojen halkaisuvetolujuus oli parhaimmillaan samaa tasoa.

Avoimessa astiassa vaahdottamisen etu on, että bitumin ja veden määrät punnitaan aina tarkoin vaa'alla ennen vaahdottamista ja että vaahtoutumisen onnistuminen todetaan silmämääräisesti välittömästi ennen massa-annoksen sekoittamista. Jos vaahdottamisen ensisijaisina kriteereinä pidetään vaahdon maksimitilavuutta ja puoliintumisaikaa, avoin astia toimii hyvin siitä huolimatta, että vaahdotusmenetelmä poikkeaa työmaan menetelmästä.

Vaahdotuskokeilun jälkeen suoritetussa näytevalmistuksessa bitumi vaahdotettiin avoimessa astiassa (vaahdotuslämpötila 170 °C ja vaahdon vesipitoisuus noin 2,5 % bitumin määrästä).

### 3.1.5 Kiviaineksen vesipitoisuuden vaikutus lujuuteen

Stabilointimassan kiviaineksen lähtövesipitoisuus on stabiloinnin rakentamiseen ja toiminnallisiin ominaisuuksiin olennaisesti vaikuttava tekijä. Paikallarakennusmenetelmällä stabiloitaessa ollaan tekemisissä luonnonkostean kiviaineksen kanssa. Bitumi leviää kylmäsekoituksessa paremmin kostean kuin täysin kuivan kiviaineksen pinnalle.

Kiviaineksen tiivistyskosteuden merkityksen selvittämiseksi tehtiin suppea koesarja, jossa tutkittiin kosteuden vaikutus VBST-stabiloinnin halkaisuvetolujuuteen. Kiviaineksen optimikosteus oli Proctor-kokeen perusteella 6,2 % kiviaineksen massasta.

Massan koostumus oli seuraava:

- Kiviaines: Teisko, rakeisuus B1
- Hienoaines: Seos 1, Teisko
- Bitumi: B160/220 vaahdotettuna
- Bit.pit.: 4 % (kiviaineksen + bitumin massasta)
- Tartuke: 0,5 % bitumin massasta (Raisamin DT)
- Tiiveys: 95 % Proctor-tiiveydestä.

Tässä koesarjassa kiviaineksen alkukosteusvaihtoehdot olivat: 2 %, 4 % ja 5,3 %. Näistä ensimmäisessä vaihtoehdossa oli kiviaineksen alkukosteus (2%) yhtä suuri kuin kiviaineksen massasta lasketun optimikosteuden ja bitumipitoisuuden erotus. Tämä menetelmä on yleisesti käytössä stabilointien suhteituksessa. Kaksi jälkimmäistä optimikosteusvaihtoehtoa ovat vaahtobitumistabiloinneille soveltuvia kiviainesten alkukosteuksia etelä-afrikkalaisen ohjeen mukaan [2], jonka mukainen suositus on, että vaahtobitumistabiloinnin kiviaineksen alkukosteus on välillä  $(0,65 \dots 0,85) \times w_{opt}$ .

Tutkittujen kosteuspitoisuuksien väliin jää tavanomaisen, ulkona varastoidun murskeen normaali vesipitoisuus (noin 3 %).

Tulokset:

Tulokset kiviaineksen alkukosteuden vaikutuksesta näytteiden halkaisuvetolujuuskeskiarvoihin on esitetty taulukossa 14. Tulosten mukaan kokeessa ei vesipitoisuudella ollut merkittävää vaikutusta, koska kaikki näytteet tiivistettiin samaan tiiveyteen.



Taulukko 14. Näytteen tiivistyskosteuden vaikutus halkaisuvetolujuuteen ja halkaisuvetojäykkyyteen (kolme rinnakkaisnäytettä,  $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , määritetyt näytteet).

vesipitoisuus		Halk. vetoluj.	Halk. vetojäykkyys
	%	kPa	MPa
$w_{\text{opt}} - \text{SAP}$	2,0	395	48
$0,65 \times w_{\text{opt}}$	4,0	382	47
$0,85 \times w_{\text{opt}}$	5,3	371	41

### 3.1.6 Näytteen valmistustavan ja korkeuden vaikutus moduuliin

Stabilointinäytteitä tiivistetään pääasiallisesti kahdella menetelmällä: kierto-tiivistimellä (esim. ICT-laite) ja täryvasaralla (esim. Kango-täryvasara). Näytteiden halkaisija on yleensä 150 mm. ICT:llä korkeuden suhde halkaisijaan on yleensä yksi ( $H/D = 1$ ), mutta Kangolla kaksi ( $H/D = 2$ ). Seuraavat tulokset näytteen valmistustavan ja korkeuden vaikutuksesta moduuliin perustuvat aiempaan tutkimukseen [3].

Näytteen valmistustapa vaikuttaa selkeästi jäykkyysmoduulien arvoihin. Yksiaksiaalisia kokeita verrattaessa (kuusi ICT -näytettä ja kuusi Kango-näytettä) todettiin, että tutkitulla komposiittistabilointimassalla Kango-näytteiden jäykkyysmoduuli oli noin 1,5-kertainen ICT -näytteisiin verrattuna. Epäsuoraan vetoon (ITT) perustuvassa menetelmässä ero oli jopa hieman isompi, Kango-näytteiden jäykkyysmoduulin ollessa noin 1,6-kertainen matalien ICT-näytteiden vastaavaan arvoon verrattuna. Kokeiden yhteydessä havaittiin selkeästi, että Kango-näytteiden jäykkyysmoduulitulosten hajonta oli pienempi ja muodonmuutuskäyttäytyminen (kaksi eri muodonmuutosanturia) tasaisempaa kuin ICT-näytteillä.

Näytteen kosteustila vaikuttaa selvästi jäykkyysmoduulin arvoon. Moduulin arvot nousivat näytteen korkeudesta riippumatta ( $h = 75$  tai  $150$  tai  $300$  mm) selvästi tai merkittävästi kolmen vuorokauden ilmakehän kuivatuksen jälkeen. Kuivatuksen ja vesiupotuksen aikana näytteistä poistui tai näytteisiin sitoutui vettä. Kosteustilan vaihtelun vaikutus jäykkyysmoduulituloksiin on esitetty taulukossa 15. ICT -näytteillä jäykkyys kasvoi 7 %, Kango-näytteillä peräti 21% ja ITT -näytteillä (matalat ICT-näytteet) jäykkyys kasvoi 12 %. ICT -näytteillä jäykkyyden muutokseen vaikutti ilmeisesti myös muita ilmiöitä (tällä sarjalla mittauksien hajonta sarjan sisällä ja näytteiden eri kosteustiloissa oli suurin ja yhden näytteen käyttäytyminen vaikutti lopputulokseen merkittävästi).

Kolmen vuorokauden vesiupotus ilmakehän kuivatuksen jälkeen muutti jälleen jäykkyyttä, nyt pääsääntöisesti alaspäin. Jäykkyys ei kuitenkaan palannut kuivattua edeltäneelle tasolle. Tämä saattoi johtua myös upotusvaiheen lyhyyydestä.



*Taulukko 15. Näytteen tiivistystavan, kosteuden, muodon ja koestusmenetelmän vaikutus jäykkyysmoduuliin.*

Näyte	Tyyppi	Koko	Koe- menetelmä	Jäykkyysmoduuli, keskiarvo (MPa) / Vesipitoisuus, keskiarvo (%)		
				Säilytys- kosteus	Ilmakuiva	Kyllästetty
1-3	ICT	150·150	1-Aks	4027 / 5.2	4287 / 3.7	4790 / 5.2
4-6	ICT	150·150	1-Aks +EK	4292 / -		
7-9	ICT	150·100	ITT	4990 / 5.3	6013 / 3.4	5360 / 5.0
10,12,14	Kango	150·150	1-Aks	6540 / -		
11,13,15	Kango	150·300	1-Aks	5743 / 4.9	7317 / 3.8	7150 / 5.3
10,12,14	Kango	150·75	ITT	8123 / -		

### 3.1.7 Näytteen säilytystavan vaikutus lujuuteen

Kylmätekniikalla valmistetut bitumilla sidotut näytteet lujittuvat hitaasti useiden kuukausien ajan. Rakennustyömaiden toteutusaikatauluihin on vaikea sovittaa suhteituskokeita, joista tulokset saataisiin vasta useiden viikkojen tai kuukausien kuluttua. Tästä syystä useissa maissa (esim. Norja, Ruotsi, Etelä-Afrikka ja Australia) on annettu ohjeita kylmätekniikalla valmistettujen bitumilla sidottujen näytteiden nopeutetusta vanhentamisesta lämpökäsittelyn avulla. Yleisiä käytössä olevia vanhennustapoja ovat esim. näytteen säilytys valmistuksen jälkeen 7 vrk lämpötilassa 40 °C tai 3 vrk lämpötilassa 60 °C.

Suomessa bitumilla sidottujen stabilointinäytteiden tavanomainen säilytystapa on, että niitä pidetään vapaasti huoneilmassa ritilän päällä muotista poistamisen jälkeen koestushetkeen asti. Jos stabilointimassanäyte sisältää hydraulista sideainetta, säilytetään sitä yleensä kosteassa ilmassa koestushetkeen asti.

Lämpötilan ja kosteustilan vaikutusta vaahtobitumistabilointinäytteiden lujuudenkehitykseen selvitettiin taulukon 16 mukaisten erilaisten säilytystapojen avulla.

Massan koostumus oli seuraava:

- kiviaines: Teiskon granodioriitti
- bitumi: B160/220 vaahdotettuna, pitoisuus 4,0 %
- tartuke: Raisamin DT, pitoisuus 0,5 m-% sideaineen määrästä
- vesipitoisuus: 2%
- Näytekoko: D 150 mm, h 150 mm
- tiiveys: 95 % Proctor-tiiveydestä.

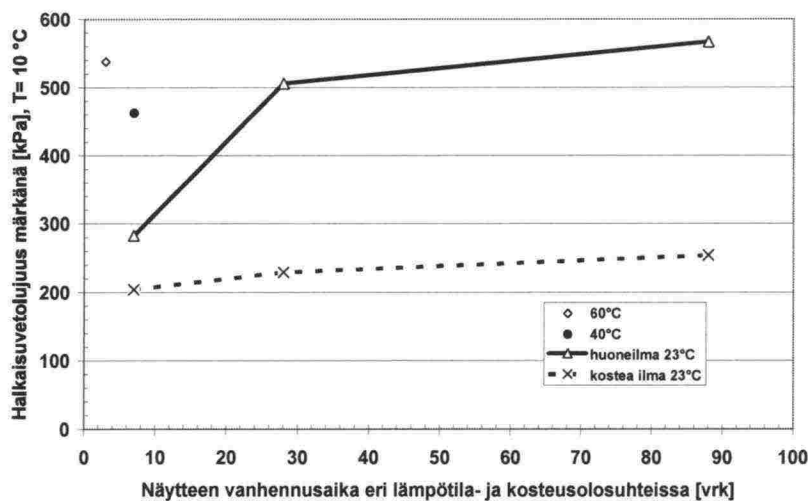
Taulukko 16. Näytteiden vanhennus vaihtoehtoisissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa.

Vanhennustapa		Vanh. jälkeen vesiupotus (vesi 40 °C)	Koestus- lämpötila
Säilytysolosuhde	Vanhennus- aika		
lämpökaappi 60 °C	3 d	3 d	10 °C
lämpökaappi 40 °C	7 d	3 d	10 °C
RH 95 % / 23 °C	7 d	3 d	10 °C
huoneilma ritilän päällä	7 d	3 d	10 °C
RH 95 % / 23 °C	28 d	3 d	10 °C
huoneilma ritilän päällä	28 d	3 d	10 °C
RH 95 % / 23 °C	91 d	3 d	10 °C
huoneilma ritilän päällä	91 d	3 d	10 °C

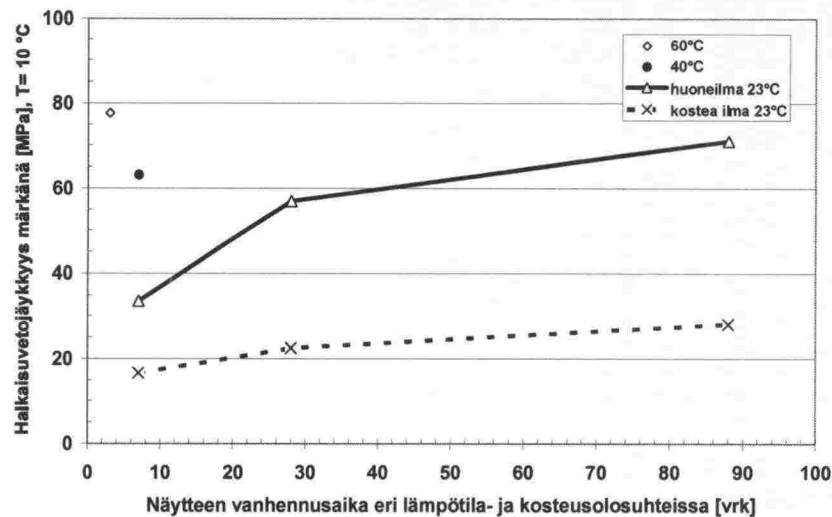
Näytteet koestettiin halkaisuvetolujuuskokeella lämpötilassa 10 °C:ssa märkinä.

#### Tulokset

VBST-näytteiden halkaisuvetolujuuden riippuvuus vanhennustavasta on esitetty kuvassa 5 ja vastaava asia halkaisuvetojäykkyyden perusteella kuvassa 6.



Kuva 5. Halkaisuvetolujuuden riippuvuus näytteen säilytysolosuhteista ja säilytysajasta. (VBST, rakeisuus B, bitumi B160/220 + tartuke, T= 10 °C).



Kuva 6. Halkaisuvetojäykkyyden riippuvuus näytteen säilytysolosuhteista ja säilytysajasta (VBST, rakeisuus B, bit. B160/220 + tartuke)

Tulosten perusteella voidaan todeta, että:

- kosteassa ilmassa vaahtobitumistabiloinnin lujuudenkehitys on erittäin hidasta
- säilytys 7 vrk 40 °C:ssa tai 3 vrk 60 °C:ssa tuottaa samaa suuruusluokkaa olevan halkaisuvetolujuuden kuin säilytys 28 vrk ajan huoneilmassa ritilän päällä.
- VBST-näytteet tulee säilyttää huoneilmassa. Näytteet eivät lujitu kunnolla kosteassa ilmassa
- säilytys 7d ajan 40 °C näyttäisi toimivan, jos on kiire aikataulu.

### 3.1.8 Tartuketarve

Stabiloinnin vedenkestävyys on tärkeää kerroksen toiminnallisten ominaisuuksien säilyvyyden ja koossapysyvyyden kannalta. Stabilointimassojen vedenkestävyys sekä tartukkeen kanssa että ilman tartuketta tutkittiin märkien ja kuivien näytteiden halkaisuvetolujuuksien suhteen perusteella.

Tartukkeen käytöllä oli erittäin suuri vaikutus vaahtobitumistabiloinnin vedenkestävyyteen. Tartukkeellinen vaahtobitumimassa oli vedenkestävää, jos vedenkestävyyttä kuvaavan tarttuvuusluvun raja-arvona pidetään 40 %. Ilman tartuketta massa ei kestänyt vettä. Tartukkeen vaikutus oli samanlainen riippumatta siitä, oliko kiviaines pelkkää mursketta tai murskeen ja rouheen seosta tai lämmitettyä kiviainesta, taulukko 17.

REST massa oli vedenkestävää myös ilman tartuketta.

Tartukkeen tehoa selittää mm. se, että bitumin ja kiven sähköinen pintavaraus on negatiivinen, samanmerkkiset sähkövaraukset hylkivät toisiaan (sähköopin mukaisesti) ja heikentävät tartuntaa. Sen sijaan tartukkeen sähköinen pintavaraus on positiivinen eli erimerkkinen kuin kiviaineksella ja erimerkkiset sähkövaraukset vetävät toisiaan puoleensa, mikä tässä yhteydessä parantaa tartuntaa.



Tartukkeen vaikutus vaahtobitumistabilointimassan raaka-ainekustannuksiin on esitetty taulukossa 18. Jos VBST-massan bitumipitoisuus on 4,0 %, on tartukkeen käytön raaka-ainekustannusvaikutus 0,7 euroa/massatonni (heinäkuun 2007 hintatasossa).

Taulukko 17. Stabilointien vedenkestävyys ja tartuketarve.

Stabilointimenetelmä		VBST	VBST	VBST	VBST	VBST	VBST	VBST	VBST	VBST	VBST	VBST	VBST	VBST	VBST	VBST
Rakeisuus		A1	A2	A3	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1
Hienoinavesversio		1	2	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bitumilaji		B160/220	B160/220	B160/220	Tartukekoille		B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220
Bitumipitoisuus	%	4,2	4,2	4,2	3,9	4,3	4,3	4,3	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,3	3,3
Tartukepitoisuus	%	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0
Kivien alkukosteus	%	3	3	3												
Vaahdotuslämpötila	°C															
Sekoitin																
Sekoitus aika	s															
Tiiveysaste	%															
ICT-kierros määrä	%	80	80	80	80	80	80	80								
Tyhjiä tila (tilav.suhdemäär. 7d)	%															
HVL, kuivat näytteet, 7+3d	kPa	759	704	764	813	721	834		724	667	811	831		390	449	344
HVL, märät näytteet, 7+3d	kPa	263	302	249	383	112	391		44	339	106	375		196	205	39
HVL:n alenema, 7+3d	kPa	496	402	515	430	609	443		680	328	704	456		194	244	305
HVL:n alenema, 7+3d	%	65	57	67	53	84	53		94	49	87	55		50	54	89
Tarttuvuus kuku, 7+3d	%	35	43	33	47	16	47		6	51	13	45		50	46	11
HVjäykkäys, kuivat näyt., 7+3d	MPa	88	79	96	93	100	97				118	105		44	41	40
HVjäykkäys, märät näyt., 7+3d		30	28	28	51	14	47				14	46		28	27	4
pelitoaste	%										65	60				

Taulukko 18. Tartukkeen vaikutus bitumin hintaan (Naantali heinäk. 2007).

	Sideainehinta	
	eur/tonni	
Bitumi B160/220	295	
Bitumi B160/220S tartuketta 0,5 %	312	
Erotus	17	

Heinäkuussa 2007 tartuketta 0,5 % sisältävä bitumi oli 5,7 % kalliimpaa kuin bitumi 160/220 ilman tartuketta.

### 3.1.9 Suhteituskokeet

#### 3.1.9.1 Yleistä

Tutkimuksessa verrattiin keskenään stabilointiohjeen mukaisia suhteitusmenetelmiä:

- kokemusperäinen suhteitus (laskentakaava)
- puolianalyttinen suhteitus
- tilavuussuhteitus kokeellisesti
- koossapysyvyyteen (HVL 7d/ 10 °C) perustuva menetelmä
- imupainekokeeseen (TS-testi) perustuva menetelmä.

#### 3.1.9.2 VBST-massan suhteitus

##### Kokemusperäinen menetelmä

Kokemusperäisillä kaavoilla laskien saatiin taulukon 19 mukaiset sideainepitoisuudet eri rakeisuuksille. Ilman rouhetta tehdyille massoille tämä sideainepitoisuus vaihteli rakeisuudesta riippuen välillä 3,3-4,2 %.

Yhdessä vaahtobitumistabilointikoostumuksessa oli mukana toimituserän 1 mukaista suhteellisen kovaa bitumia sisältävää PAB-B-rouhetta, jonka osuus oli 25 % (rouheen ja kiviaineksen massasta). Kokemusperäisen suhteitusmenetelmän kaavojen 1 ja 3 mukaan laskettu rouhetta sisältävän VBST-massan lisäbitumipitoisuus oli 3,4 %.

*Taulukko 19. VBST-massojen sideainepitoisuudet kokemusperäisen kaavan mukaan.*

RC-pitoisuus %		25
Rakeisuus	ilman rouhetta	PAB-RC 25%
	SAP <sub>0</sub>	Lisäbitumi-pit. SAP <sub>L</sub>
	m-%	m-%
A	4,2	
B	4,0	3,4
C	3,3	
SAP-rouhe		4,5
sitoutumis-kerroin		0,5

##### Puolianalyttinen menetelmä

Vaahtobitumistabilointimassan puolianalyttinen suhteitusmenetelmä tuotti rakeisuudesta riippuen Stabilointiohjeen mukaisen täyttöasteen alarajalla 0,7 - 1,2 %-yksikköä alhaisemmat ja täyttöasteen ylärajalla 0,1- 0,8 %-yksikköä alhaisemmat ohjesideainepitoisuudet kuin kokemusperäiseen kaavaan perustuva menetelmä, taulukko 20.



Taulukko 20. VBST-massan tilavuussuhteet ja bitumipitoisuus (puolianalyytinen menetelmä).

		Rakeisuusvaihtoehto				
		A1	A2	A3	B	C
Hienoin. TT	til-%	39,7	41,3	44,8	39,2	41,3
KAT (särm.)	til-%	20,4	21,3	23,1	18,9	17,6
kiviain. tiheys	kg/m <sup>3</sup>	2710	2711	2710	2698	2653
	TA (til-%)	Sideainepitoisuus m-%				
	36	3,3	3,5	3,8	3,0	2,8
	41	3,7	3,9	4,3	3,4	3,2
	TA (til-%)	Päällysteen tyhjätila (t-%)				
	36	13,0	13,6	14,8	12,1	11,3
	41	12,0	12,5	13,6	11,2	10,4

#### Kokeellinen menetelmä

Kokeellisessa menetelmässä määritettiin tutkittavien vaahtobitumistabilointimassojen tilavuussuhteet ja tehtiin tilavuussuhteitusnäytteille halkaisuvetolujuuskokeita. Rakeisuuden A osalta selvitettiin myös kolmen eri hienoainesvaihtoehdon vaikutus halkaisuvetolajuuteen.

Kullekin koostumukselle tehtiin märkien ja kuivien näytteiden halkaisuvetolujuuksien suhteeseen perustuva vedenkestävyyskoe (PANK 4301).

VBST-massan tavoitesideainepitoisuuden määrittämiseksi kokeellisella menetelmällä tehtiin ennakkokokeita:

- tilavuussuhdemääritykset kullekin rakeisuudelle
- tilavuussuhteitusnäytteistä tutkittiin halkaisuvetolujuus 10 d iässä
- vedenkestävyyskokeita, ks. taul. 17.

#### Sideainepitoisuuden valinta VBST:n suhteituskokeiden perusteella

Kokemusperäisten ja kokeellisten suhteitusmenetelmien perusteella määritetty VBST-massan ohjeelliset sideainepitoisuudet on esitetty taulukossa 21.

Taulukko 21. VBST-massojen sideainepitoisuusvalinnat eri suhteitusmenetelmien perusteella.

		Rakeisuusvaihtoehto				
		A1	A2	A3	B	C
	TA (til-%)	Sideainepitoisuus m-%				
Puolianalyytinen suhteitus	36	3,3	3,5	3,8	3,0	2,8
	41	3,7	3,9	4,3	3,4	3,2
Kokemusperäinen kaava		4,2	4,2	4,2	4,0	3,3
Kokeellinen menetelmä (HVL 7d kuiva)	SAP (m-%)		4,2	4,2	4,0	3,0
	TA (til-%)		37	38	41	

Ilman rouhetta valmistettujen VBST-massojen perusvaihtoehtojen tavoit-  
tesideainepitoisuuksiksi kullekin rakeisuudelle valittiin Stabilointiohjeen ko-  
kemusperäisen kaavan mukaiset arvot:

- rakeisuuksille A1, A2 ja A3 4,2 %
- rakeisuudelle B 4,0 %
- rakeisuudelle C 3,3 %.

### 3.1.9.3 REST-massan suhteitus

REST- massan rakeisuudelle B tehtiin kokeellinen suhteitus ja muiden koos-  
tumusten bitumipitoisuudet valittiin B-rakeisuuden suhteituskokeiden ja ko-  
kemusperäisten kaavojen avulla.

#### Kokeellinen suhteitus vedenkestävyyden perusteella

REST-massan koostumus:

- PAB rouhepitoisuus 50% (toimituserä 1)
- lisäkiviaineksen ja rouheen kiviaineksen yhdistetty rakeisuus käyrän B mukainen
- suhteituskokeissa tutkittiin lisäbitumipitoisuusvaihtoehdot 1,8 – 2,4 % jää-  
vää bitumia.

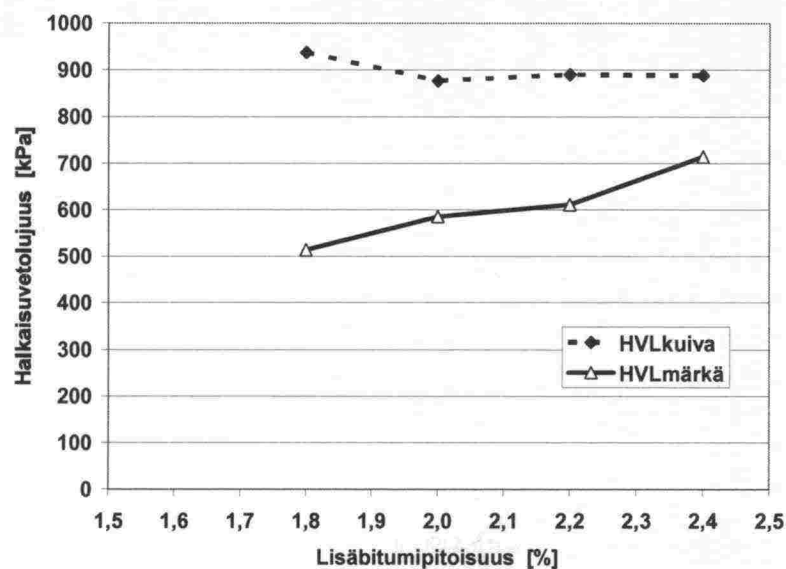
Bitumipitoisuuden lisäys paransi REST-massan märkänä koestettujen näyt-  
teiden halkaisuvetolujuutta ja vedenkestävyyttä. Sen sijaan kuivina koestettu-  
jen näytteiden halkaisuvetolujuus ei kasvanut, kun bitumipitoisuus kasvoi,  
taul. 22 ja kuvat 7-9.

Tämän koesarjan perusteella jäävä lisäbitumipitoisuus 1,8 % oli riittävä (ra-  
keisuudella B). Stabilointiohjeen mukaan tarttuvuusluvun tulee olla yli 40 %.

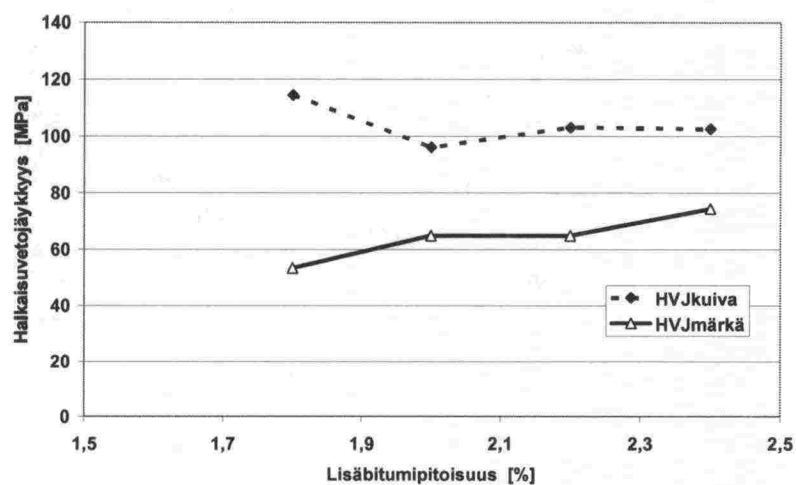
*Taulukko 22. REST-koemassojen vedenkestävyydet  
(rakeisuus B, rouheen toimituserä 1)*

Lisäbitumipitoisuus (B160/220)	%	1,8	2,0	2,2	2,4	2,0
Kokonaisbitumipitoisuus	%	4,0	4,2	4,4	4,6	4,2
ICT-kierrosmäärä		100	100	100	100	400
HVL, kuivat näytteet, 7+3d	kPa	937	877	890	888	899
HVL, märät näytteet, 7+3d	kPa	514	586	612	715	450
HVL:n alenema, 7 d+3d	kPa	423	291	278	173	449
HVL:n alenema, 7+3d	%	45	33	31	19	50
Tarttuvuuskuku, 7+3d	%	55	67	69	81	50
HVjäykkyys, kuivat näytt., 7+3d	MPa	114	96	103	102	103
HVjäykkyys, märät näytt., 7+3d	MPa	53	65	65	74	38
HVjäykk. alenema, 7+3d	MPa	61	31	38	28	65
HVjäykk. alenema, 7+3d	%	53	32	37	27	63
peittoaste %, silmämäär. arvio	%	78		83	90	

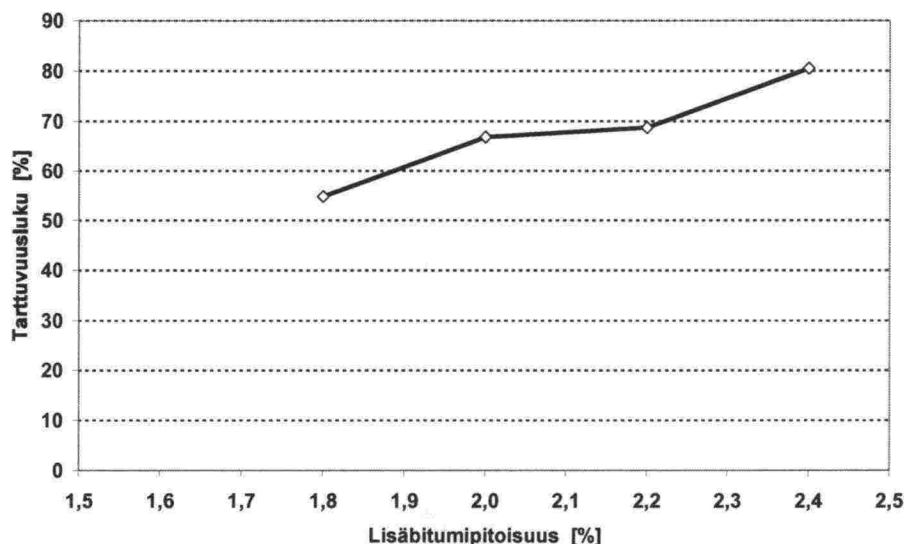




Kuva 7. REST (rak. B) halkaisuvetolujuuden riippuvuus lisäbitumipitoisuudesta.



Kuva 8. REST (rak. B) halkaisuvetojäykkyyden riippuvuus lisäbitumipitoisuudesta.



Kuva 9. REST (rak. B) vedenkestävyyden riippuvuus lisäbitumipitoisuudesta.

#### Kokeellinen suhteitus dielektrisyiden perusteella (TS-menetelmä)

TS-menetelmällä (ilmupainekokeella) pyrittiin selvittämään pienin lisäbitumipitoisuus, joka tarvitaan sitomaan stabilointimassanäytteen hienoaines. Kun hienoaines sidotaan, massan vedenkestävyys paranee ja sidotun kerroksen "routimisherkyys" pienenee. Menetelmä on Stabilointiohjeen 2002 mukainen REST-massan suhteitusmenetelmä. TS-menetelmän mukaisen kokeen suoritus on kuvattu lyhyesti kohdassa 2.3.11.

TS-menetelmän laitteet (näyttölaite + anturi) ja mittausten suoritus on esitetty kuvassa 10.

REST-massan koostumusvaihtoehdot (2 rinnakkaisnäytettä):

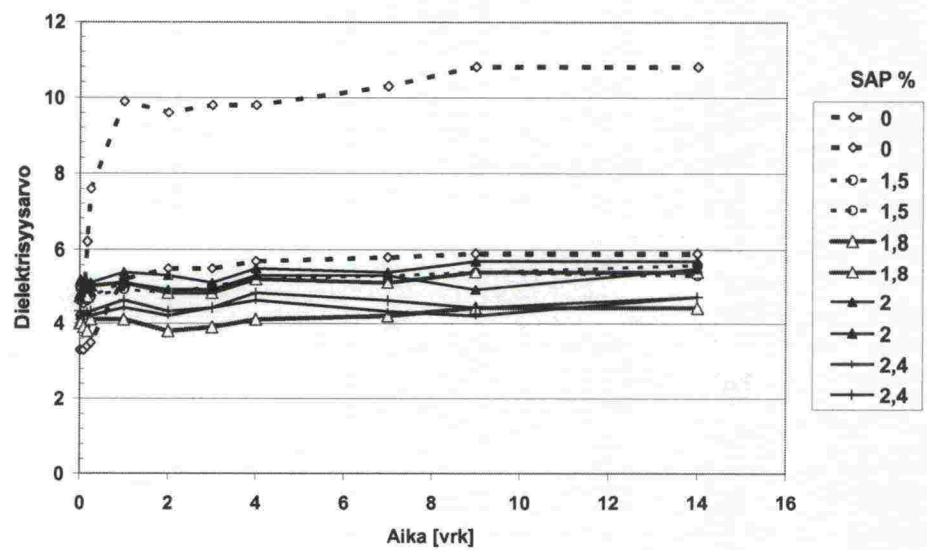
- PAB rouhepitoisuus 50% (toimituserä 1)
- lisäkiviaineksen ja rouheen kiviaineksen yhdistetty rakeisuus käyrän B mukainen
- lisäbitumipitoisuusvaihtoehdot 1,5 – 2,4 % jäävää bitumia (vertailunäyte sitomaton).

Tutkittujen REST-massojen dielektrisyysmittauksissa ei 14 vrk seuranta-aikana todettu dielektrisyiden muutosta, jonka perusteella olisi voitu valita massan tavoitebitumipitoisuus, kuva 11.





Kuva 10. Dielektrisyysmittaus Percometer-laitteella.



Kuva 11. REST-näytteiden dielektrisyysmittaustulokset.

Kokemusperäinen suhteitus

Rakeisuussuhteituksessa rouheen sisältämä kiviaines oli yksi kiviaineslajite. Koska käyrän muodosta johtuen ohjerakeisuuden C mukaiseen käyrään ei "mahtunut" rouhetta enempää kuin 25 %, muutettiin tämän raekoostumuksen rouheen osuudeksi 25 % aiemmin suunnitellun 50 % asemasta. Rouheen osuuden vähentäminen kasvatti vastaavasti lisättävän bitumin määrää. Rouheen osuus on laskettu prosentteina rouheen ja kiviaineksen yhteismassasta.

Kokemusperäisen suhteituksen mukaisissa laskelmissa käytetty sitoutumiskerroin kuvaa sitä osaa rouheen vanhasta bitumista, jonka oletetaan toimivan sitovana stabilointimassasta. Valitut sitoutumiskertoimet perustuivat vuoden 2002 Stabilointiohjeeseen.

REST-massan rakeisuudelle B tehtiin kokeellinen suhteitus ja muiden koostumusten bitumipitoisuudet valittiin B-rakeisuuden suhteituskokeiden ja kokemusperäisten kaavojen avulla. Massan bitumipitoisuus jäi huomattavan korkeaksi, koska lisäbitumipitoisuudet valittiin pääosin läheltä kokemusperäinen kaavan ohjeellista lisäbitumipitoisuutta. Kokemusperäinen kaava osoitautui vievän rouhetta sisältävän massan bitumipitoisuuden huomattavan korkeaksi.

REST-massan ohjeellinen lisäbitumipitoisuus rakeisuuksilla A-C on kokemusperäisellä kaavoilla 1 ja 3 laskettuna on taulukon 23 mukainen. Taulukossa 23 ja kuvissa 7-9 PAB-rouhe oli toimituserää 1.

*Taulukko 23. REST-massan ohjeellinen lisäbitumipitoisuus kokemusperäisen kaavan mukaan (PAB-rouheen toimituserä 1).*

Rakeisuus	PAB-RC 25%	PAB-RC 50%	AB-RC 50%
	Lisäsideainepitoisuus SAP <sub>L</sub>		
	m-%	m-%	m-%
A		2,3	
B	3,0	2,0	2,2
C	2,3		
SAP-rouhe	4,5	4,5	5,1
sitoutumiskerroin	0,9	0,9	0,7

Lisäkoenäytteitä valmistettaessa rouheen toimituserä ja Teiskon kiviainesten toimituserä vaihtuivat. Lisäkokeiden rouheen (toimituserän 2) alhaisemman sideainepitoisuuden (2,9 %) vuoksi uusintakoenäytteiden lisäbitumipitoisuus nousi. Uutta rouhe-erää käyttäen ei tehty uutta kokeellista suhteitusta, vaan näiden näytteiden bitumipitoisuus valittiin kokemusperäisellä kaavalla. Toimituserän 2 PAB-rouheen mukainen kokemusperäisellä kaavalla laskettu lisäbitumipitoisuus oli:

- rakeisuudella A: 2,8 % (koostumus R2-A)
- rakeisuudella B: 2,7 % (koostumus R8-B).

Rakeisuuden A mukaisen REST-massan rouheen kiviaineksen ja uuden toimituserän lisäkiviaineksen yhdistetyn rakeisuuskäyrän # 0,063 mm hienoineksen läpäisy oli 10,8 % (tavoite oli 12 %, kuten myös ensimmäisen valmistuserän toteuma). Lisäkokeen rakeisuuden A mukaisen koostumuksen



(R2-A) lisäbitumipitoisuudeksi oli valittu kokemusperäisellä kaavalla rakeisuustavoitteen mukaisen hienoainespitoisuuden perusteella 3,0 %. Se oli siten 0,2 %-yksikköä suurempi kuin kokemusperäisen kaavan mukaan laskettu toteutuneen hienoainespitoisuuden mukainen lisäbitumipitoisuus, taul. 24.

#### REST-massojen tavoitesideainepitoisuuksien valinta

REST-massaan lisättävän bitumin tavoitepitoisuus riippuu kokemusperäisiä kaavoja käytettäessä:

- stabilointimassan hienoainespitoisuudesta,
- rouheen osuudesta,
- rouheen sisältämän bitumin kovuudesta ja
- rouheen bitumipitoisuudesta
- työtekniikasta.

Noin 50% rouhetta sisältävän REST-massan B-rakeisuuden lisäsideainepitoisuuden tavoitearvoksi valittiin vedenkestävyyskokeiden perusteella 1,8 %, mikä on 0,2 %-yksikköä alle kokemusperäisen kaavan ohjeellisen lisäbitumipitoisuuden. Koska kokemusperäisen kaavan avulla voidaan ottaa huomioon rouheen ja kiviainesten ominaisuudet tutkimuksen eri koostumuksille soveltuvalle tavalla, lisättävän bitumin tavoitepitoisuudet on esitetty taulukossa 24 kokemusperäisten kaavojen ohjeellisiin lisäbitumipitoisuuksiin verrattuna. Eri massakoostumukselle on luonnollisesti eri suuruiset lisäbitumipitoisuudet. Jatkotutkimuksiin valittuja massoja valmistettiin taulukon 24 mukaisilla valituilla bitumipitoisuuksilla.

Osaa REST-massan laboratoriokokeista jatkettiin lisämäärytyksin, koska näytteiden tiiveydet olivat jääneet alhaisiksi. Lisäkokeissa rakeisuuden A mukaisen massan (R2-A) sideainepitoisuus ylitti 0,2 %-yksikköä kokemusperäisen kaavan mukaisen lisäbitumipitoisuuden ja rakeisuuden B mukaisen perusvaihtoehdon (R8-B) lisäbitumipitoisuus oli kokemusperäisen kaavan mukainen.

*Taulukko 24. REST-massakoostumusten kokemusperäisten kaavojen mukaan lasketut ohjeelliset lisäbitumipitoisuudet ja näytevalmistukseen valitut bitumipitoisuudet.*

Koostumus		R1-A	R2-A	R3-A	R4-A	R5-B	R6-B	R7-B	R8-B	R9-B	R10-B	R11-B	R12-B	R13-B	R14-C	R15-C	R16-C
Rakeisuus		A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	C	C	C
0,063 läpäisy	%	12,0	10,8	11,8	11,8	9,9	9,9	9,9	9,7	9,7	9,7	9,9	9,9	9,9	4,9	4,6	4,6
Rouhetyyppi		PAB	PAB	PAB	PAB	PAB	PAB	PAB	PAB	PAB	PAB	PAB	PAB	AB	PAB	PAB	PAB
RC (kivien+rouheen mass.)	%	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	25	50	25	25	25
RC (REST:n massasta)	%	49,0	48,5	49,0	49,2	49,4	49,1	49,1	48,7	49,0	49,3	48,6	24,1	49,0	24,4	24,5	24,7
sitoutumiskerroin		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,9	0,9	0,9
Rouheen bit.pit.	%	4,5	2,9	2,95	2,95	4,5	4,5	4,5	2,9	2,95	2,95	4,5	4,5	5,1	4,5	2,95	2,95
<b>Kokemusperäisten kaavojen mukaan</b>																	
Lisäbit.pitoisuus	%	2,3	2,8	3,0	2,9	2,0	2,0	2,0	2,7	2,7	2,6	2,0	3,0	2,2	2,3	2,6	2,6
Teholl. bit. yht.	%	4,3	4,1	4,2	4,2	4,0	4,0	4,0	4,0	3,9	3,9	4,0	4,0	4,0	3,3	3,2	3,2
Kokonaisbit.pit.	%	4,5	4,3	4,4	4,4	4,2	4,2	4,2	4,1	4,1	4,1	4,2	4,1	4,7	3,4	3,3	3,3
<b>Ohj = kokemusperäisen kaavan mukainen ohjeellinen lisäbitumipitoisuus</b>																	
Valittu SAP	%	ohj-0,2	ohj.+0,2	ohj-1,0	ohj-1,2	ohj-0,7	ohj-0,2	ohj-0,2	ohje	ohj-0,7	ohj-1,2	ohj+0,8	ohj+0,6	ohj-0,2	ohj+0,2	ohj-0,7	ohj-1,3
<b>Valitun SAP:n mukaan</b>																	
Lisäbit.pitoisuus	%	2,1	3,0	2,0	1,7	1,3	1,8	1,8	2,7	2,0	1,4	2,8	3,6	2,0	2,5	1,9	1,3
Teholl. bit. yht.	%	4,1	4,3	3,3	3,0	3,3	3,8	3,8	4,0	3,3	2,8	4,8	4,6	3,7	3,5	2,5	2,0
Kokonaisbit.pit.	%	4,3	4,4	3,4	3,1	3,5	4,0	4,0	4,1	3,4	2,9	5,0	4,7	4,5	3,6	2,6	2,1



Lisäkokeissa tehtiin REST-massoja myös työmaan käytännön mukaisilla bitumipitoisuuksilla, jotka olivat 0,7-1,3 %-yksikköä alhaisempia kuin kokemusperäisen kaavan mukaan lasketut vastaavat arvot.

Bitumipitoisuudet (taul. 24) on laskettu prosentteina REST:n (vedettömästä) massasta. Lisäbitumipitoisuus sisältää massaan lisättävän uuden bitumin. Tehollinen bitumipitoisuus sisältää lisäbitumin ja rouheen bitumista tehollisen osuuden, joka määräytyy bitumin kokemusperäisen sitoutumiskertoimen perusteella. Kokonaisbitumipitoisuus sisältää sekä lisäbitumin että kaiken rouheessa olevan bitumin. Tutkimustuloksia on verrattu tutkimusraportissa yleensä REST:n teholliseen bitumipitoisuuteen.

Rouheen osuudet on näytevalmistuksessa laskettu prosentteina rouheen ja kiviaineksen yhteismassasta. Koska kokemusperäisessä kaavassa (3) RC-pitoisuus on asfalttirouheen osuus massasta, on tähän kaavaan perustuvissa lisäbitumipitoisuuslaskelmissa käytetty RC-prosentina taulukon 24 mukaista prosentteina REST:n massasta laskettua RC-pitoisuutta.

Toiminnallisten ominaisuuksien ensi vaiheen kokeisiin valittu lisäbitumipitoisuus poikkeama (-0,2% yks.) perustui kokeellisen suhteitusmenetelmän vedenkestävyyskokeiden tuloksiin B-rakeisuudella (vakiotiivistystyö määrä 100 r, ikä 7+3d). Kokeellisen suhteituksen perusteella valittu lisäbitumipitoisuus oli 0,2 %-yksikköä alle kokemusperäisen kaavan mukaisen arvon. Muille REST-massoille ei tehty vedenkestävyyskoetta suhteituksen yhteydessä.

Bitumipitoisuuden poikkeamat kokemusperäisen kaavan mukaisesta ohjeellisesta arvosta REST-massalla R5-B (ero - 0,7 %-yks.) ja massalla R11-B (ero +0,8%-yks.) perustuvat suunniteltuun poikkeamaan ja suhteituskokeen vedenkestävyyskoetulokseen. Massassa R14-C on suhteituksen poikkeaman vuoksi 0,2 %-yksikköä liikaa ja massassa R12-B on 0,6 %-yksikköä liikaa bitumia verrattuna kokemusperäisen kaavan perusteella laskettuun ohjeelliseen lisättävään bitumipitoisuuteen, taulukko 24.

Vertailun vuoksi voidaan todeta, että Vöyrin koetiellä käytettiin REST-koealueilla emulsiossa bitumia, joka oli yhden tunkeumaluokan pehmeämpää kuin laboratoriokokeissa. Koetiellä REST-massojen jäännösbitumipitoisuudet (kokonaisbitumimäärä) olivat taulukon 25 mukaiset [10].

*Taulukko 25. Vöyrin koetien REST-koealueiden jäännösbitumipitoisuudet (bitumi B250/330)*

	Jäännösbit. pitoisuus	Kerros- paksuus
	%	mm
Tavoite	3,4	
Toteuma	3,3 - 3,8	100
	3,8 - 3,9	150

Asfalttinormeissa on osittain tai kokonaan vanhan kerroksen bitumistabiloinnin rakeisuuden yleiselle ohjealueelle on annettu bitumipitoisuuden ohjeelliseksi arvoiksi 3,2 - 4,2 % (hienoainespitoisuudella 5-12 %).

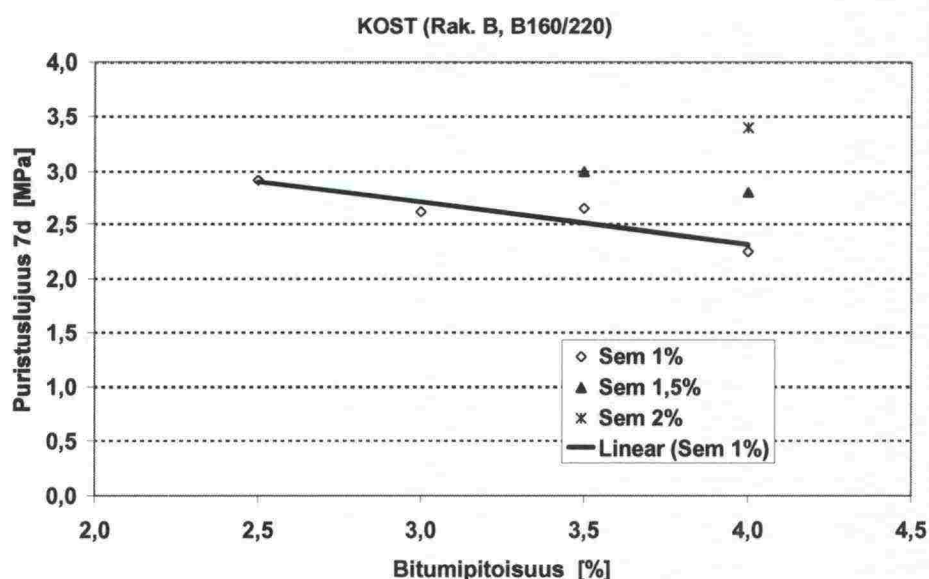
### 3.1.9.4 KOST-massan suhteitus

Komposiittimassan B koostumuksen perusvaihtoehto K5-B suhteitettiin kokeellisesti. Muiden massakoostumusten sideainepitoisuuksien valinnassa hyödynnettiin koostumuksen B tuloksia ja VBST-massoilla tehtyjä ennakkokokeita.

Komposiittistabilointimassan kokeellista suhteitusta varten tutkittiin massan puristuslujuus 7 d iässä ja halkaisuvetolujuus 1 d iässä. Puristuslujuuskoetulokset on esitetty taulukossa 26 ja kuvassa 12. KOST-massan halkaisuvetolujuudet (ikä 1 d, T 23 °C) on esitetty taulukossa 27 ja halkaisuvetolujuuden riippuvuus bitumipitoisuudesta kuvassa 13 ja halkaisuvetolujuuden riippuvuus sementtipitoisuudesta kuvassa 14.

Taulukko 26. KOST-massan puristuslujuus (7d, B160/220, rakeisuus B)

Koostumuksen	Näyte	Bit	Tartuke	Sem	Bit / Sem	Bit + Sem	Puristuslujuus
		%	%	%		%	MPa
KoB 11	ka	2,5	ei	1,0	2,5	3,5	2,9
KoB 12	ka	3,0	ei	1,0	3,0	4,0	2,6
KoB 13	ka	3,5	ei	1,0	3,5	4,5	2,6
KoB 14	ka	3,5	0,5	1,0	3,5	4,5	2,3
KoB 15	ka	3,5	ei	1,5	2,3	5,0	3,0
KoB 16	ka	4,0	ei	1,0	4,0	5,0	2,3
KoB 17	ka	4,0	ei	1,5	2,7	5,5	2,8
KoB 18	ka	4,0	ei	2,0	2,0	6,0	3,4



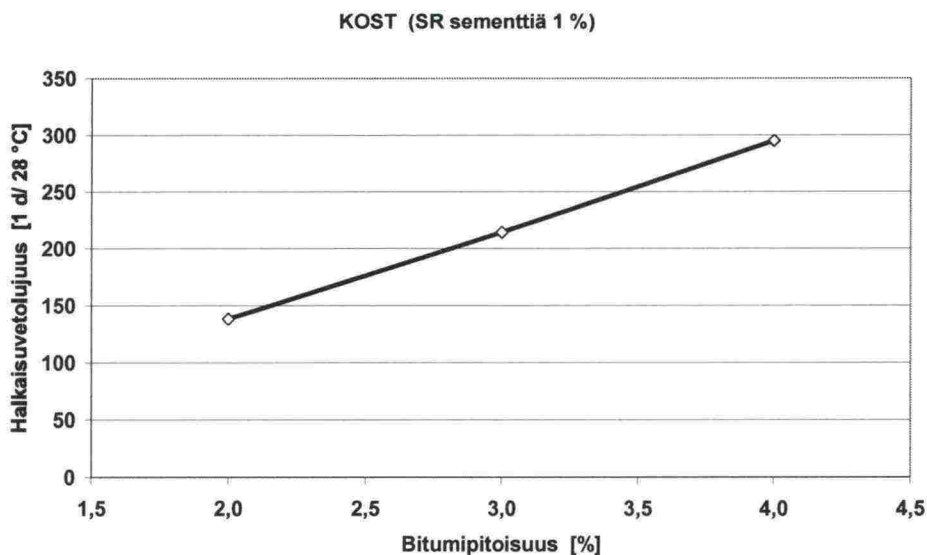
Kuva 12. KOST-massan puristuslujuus (7d, B160/220, rakeisuus B)

Kuvaan 12 on piirretty suora, joka kuvaa 1 % sementtiä sisältävien KOST-massojen puristuslujuuden riippuvuutta bitumipitoisuudesta. Vaikka tulos perustuu suhteellisen pieneen aineistoon, osoittaa se, että sementtipitoisuuden ollessa vakio, bitumipitoisuuden kasvu kuvan vaihteluvälillä heikensi puristuslujuutta.

Kun sementtipitoisuus oli 1,5 %, riippuvuus oli tällä aineistolla kuvan 12 mukaan samansuuntainen.

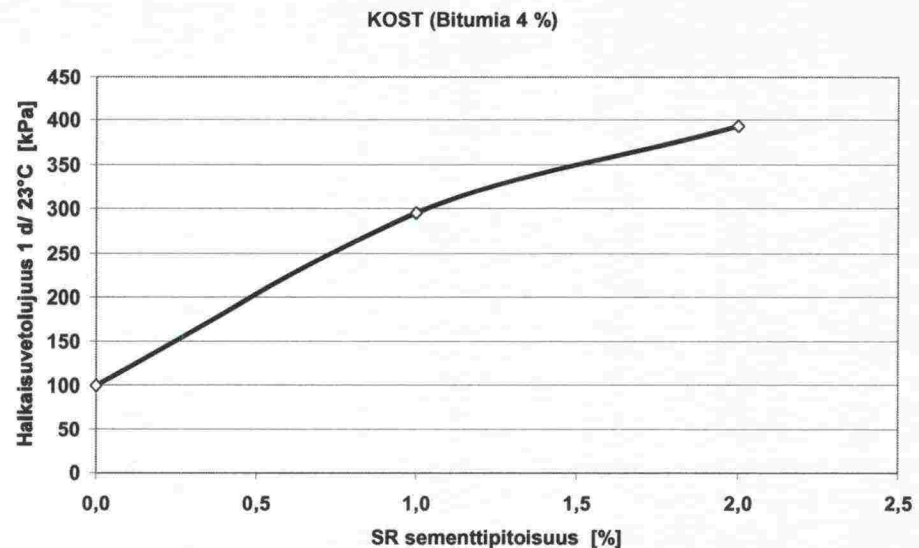
Taulukko 27. KOST-massan suhteituskoenäytteiden halkaisuvetolujuus (7d, B160/220, rak. B)

	yks	Näyte	KoB21	KoB22	KoB23	KoB24	KoB25
SR sementti	m-%		0,0	1,0	1,0	1,0	2,0
Bitumia B160/220 vaahd	m-%		4,0	4,0	3,0	2,0	4,0
Tartuke (Raisamin DT)	% bit:sta		0	0	0	0	0
kosteus (% kiviainesten massasta)	m-%		2,0	2,2	3,2	4,3	2,3
HVL 1d/ 23 °C	kPa	a	94	306	202	119	368
		b	106	295	212	146	390
		c	99	284	229	150	421
		ka	100	295	214	138	393



Kuva 13. KOST:n halkaisuvetolujuuden riippuvuus bitumipitoisuudesta (SR-sem 1%).





Kuva 14. KOST:n halkaisuvetolujuuden riippuvuus sementtipitoisuudesta (bit 4 %)

Suhteituskokeiden perusteella valittiin KOST-massan B-rakeisuuden perusmassalle bitumipitoisuus 3% ja sementtipitoisuus 1 %. Sementin ja bitumin sideainesuhteeksi valittiin kaikille toiminnallisten ominaisuuksien KOST-massoille sem / bit = 0,33

Muiden KOST-koostumusten bitumipitoisuudet valittiin samassa suhteessa kuin VBST-massojen vastaaville koostumuksille. Kunkin sementtipitoisuus oli noin kolmannes bitumipitoisuudesta, taul. 28.

Taulukko 28. KOST- rakeisuusvaihtoehtojen A-C valitut sideainepitoisuudet

		Koostumusvaihtoehdot K1-K10										
		yläraja-käyrä	vähemm. bit.	enemmän sem.	löyhempi	perusratkaisu		enemmän sem.	enemmän bit.	rouhe	pehm. bit.	alaraja-käyrä
		K1-A	K2-B	K3-B	K4-B	K5-B	K6-B	K7-B	K8-B	K9-B	K10-B	K11-C
Rakeisuuskäyrä		A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	C
PAB-B-rouhepitoisuus	%	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0
Bitumi vaahdotettuna		B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B 70/100	B650/900	B160/220
Bitumipitoisuus	%	3,2	2,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0	3,6*)	3,0	2,5
SR-sementtipitoisuus	%	1,1	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	0,9	1,0	0,8
Vesipitoisuus	%	4,3	3,8	3,3	3,2	3,2	3,2	3,4	2,2	2,1	3,2	4,0
vesisementti-suhde		3,9	3,8	2,2	3,2	3,2	3,2	1,7	2,2	2,3	3,2	5,0

\*) Koostumuksen K8 bitumipitoisuus sisältää 1 %-yksikön rouheen bitumia.

KOST:n bitumipitoisuus prosentteina laskettiin kiviaineksen ja bitumin yhteismassasta. Sementti- ja lisävesipitoisuus laskettiin kiviaineksen massasta. Vesisementtisuhdetta nosti se, että tiivistysvaiheessa massassa olevan lisäveden ja lisäbitumin yhteismäärä valittiin siten, että se vastasi kiviainesrungon optimikosteuspitoisuutta.

### 3.2 Toiminnalliset ominaisuudet

#### 3.2.1 Tutkitut materiaalit

Vaahtobitumi-, Remix- ja komposiittistabilointimassojen (VBST, REST ja KOST) toiminnalliset ominaisuudet tutkittiin useilla vaihtoehtoisilla massan koostumuksilla. Toiminnallisten ominaisuuksien tutkimus sisälsi yhteensä 43 erilaista raaka-ainekoostumus- tai tiiveysvaihtoehtoa. Eri koostumusten si-deainepitoisuudet valittiin osin kokeellisesti ja osin kokemuseräisesti. Näis-sä tutkimuksissa käytetyt materiaalit on esitetty taulukossa 29.

Taulukko 29. Tutkittujen stabilointimassojen materiaalivaihtoehdot.

		M a s s a t y y p p i		
		VBST	REST	KOST
		Tutkitut vaihtoehdot		
Koostumuksia	kpl	16	16	11
Rakeisuudet	kpl	3	3	3
Bitumilajit		vaahd. B160/220 B70/100 B650/900	emulsio B160/220	vaahd. B160/220 B70/100 B650/900
Teholl. bitumipitoisuus *)		3,3 – 5,2 %	2 – 4,8 %	2,5 – 4,0 %
Tartukepitoisuus (bitumin massasta)		Raisamin DT 0,5 %	0	0
Sementti		ei	ei	SR-sem.
SR-sementtipitoisuus *) (kiviaineksen massasta)	%	0	0	0,8 – 2,0 %
Rouhe		PAB-B tai ilman	PAB-B tai AB	PAB-B tai ilman
Rouheen osuus *)	%	0 tai 25	25 tai 50	0 tai 25
Sekoituslämpötila		20-23 tai 60°C	lämmin	20-23 tai 60°C
Tiiveys VE1 **) % Proctor-tiiveydestä		85 - 100	89 - 101	90 - 95

\*) bitumipitoisuus on laskettu % kiviaineksen ja bitumin yhteismassasta, sementtipitoisuus ja vesipitoisuus % runkoaineksen massasta ja rouheen osuus % runkoaineksesta (= kiviaineksen ja rouheen yhteismas-sasta).

\*\*) Uusintakokeiden näytteet tiivistettiin tiiveyteen 96 % ICT 200 r tiiveydestä.

#### 3.2.2 Perusvaihtoehtojen ominaisuudet

Muuttujien suuren määrän vuoksi valittiin kustakin stabilointityypistä (VBST, REST ja KOST) yksi koostumus perusvaihtoehdoksi, joka tutkittiin muita vaihtoehtoisia koostumuksia laajemmin. Raaka-aineiden ja eri tekijöiden vai-kutusta stabilointimassan ominaisuuksiin selvitettiin muuttamalla vain yhtä muuttujaa tähän perusvaihtoehtoon verrattuna.

Perusvaihtoehtoja olivat VBST:n koostumukset V8-B ja V9-B, REST:n koostumukset R7-B ja R8-B sekä KOST:n koostumukset K5-B ja K6-B. Kullekin stabilointityypille tuli B-rakeisuuden peruskoostumuksia oli kaksi kpl, koska kesken tutkimuksen vaihdettiin tiiveystavoitteen valintamenetelmää. Tämän seurauksena eri ajankohtina tehtyjen perusmassanäytteiden välillä oli tiiveyseroja. Perusvaihtoehtojen keskeisten ominaisuuksien keskiarvotulokset on esitetty taulukossa 30.

Koska Asfalttinormit eivät aseta stabiloinneille erityisiä toiminnallisia vaatimuksia, joudutaan vertailulähtökohtina käyttämään muiden materiaalien laatuvaatimuksia:

- Vedenkestävyyden ohjearvo (menetelmä) PANK 4301:
  - stabilointi on vedenkestävä, jos tarttuvuusluku  $> 40$  % (Stabilointiohje)
  - PAB-B on vedenkestävä, jos tarttuvuusluku  $\geq 60$  % (Asfalttinormit),
- Betonirakenteita pidetään pakkasenkestävinä, jos niiden lujuus jäädytys-sulatuskokeen jälkeen on vähintään 67 % vanhentamattoman materiaalin vastaavasta lujuusarvosta,
- Kiinteytetyn saastuneen maa-aineksen ohjearvot ovat [4]:
  - puristuslujuus silikaattisideaineilla sidotuilla materiaaleilla käyttökohdeesta riippuen  $\geq 2,5$  MPa,  $\geq 3,5$  MPa tai  $\geq 5$  MPa
  - tarttuvuusluku  $\geq 50$  % (PANK 4301)
  - lujuus jäädytys-sulatuskokeen jälkeen  $> 65$  % vertailulujuudesta
  - halkaisuvetolujuus bitumilla sidotuilla materiaaleilla  $> 100$  kPa ( $10^{\circ}\text{C}$ ).

Asfalttimassojen jako deformaatioluokkiin (PANK 4208) on Asfalttinormien mukaan seuraava:

- Luokka I      deformaatio  $\leq 2,0$  %,
- luokka II     deformaatio  $\leq 3,5$  %,
- luokka III    deformaatio  $\leq 5,0$  %
- luokka IV     deformaatio  $\leq 6,5$  %.

Käytännössä näyte saattaa rikkoutua ennen kuin se saavuttaa III- tai IV-luokan deformaation.

Peruskoostumuksista oli KOST:lla paras vedenkestävyys, pakkasenkestävyys ja deformaatiokestävyys ja vähäisin jäykkyysmoduulin lämpötilaherkkyys.

Kun lämpötila nousi  $5^{\circ}\text{C}$ :sta  $25^{\circ}\text{C}$ :een, aleni KOST:n perusvaihtoehdon jäykkyysmoduuli noin 25 %. Vastaava jäykkyyden alenema oli VBST:n perusvaihtoehdolla 75 %, kuva 15.

Peruskoostumuksilla oli VBST:n tyhjätila noin 12 % ja KOST:n noin 15 % (tiivistetty 96 % ICT 200 r tiiveydestä).

REST:n perusvaihtoehdon ensi vaiheen näytteet tiivistettiin 93 %:iin Proctor-tiiveydestä ja niiden tyhjätila jäi alhaiseksi (noin 17 %). Tämän jälkeen tehdyissä lisäkokeissa näytteet tiivistettiin 96 %:iin ICT:n 200 r tiiveydestä (101 % Proctor-tiiveydestä) ja tyhjätila oli noin 10 %, taul 30.



Useilla REST-koostumuksilla oli suhteellisen korkea bitumipitoisuus verrattuna työmaakäytäntöön. Alhainen tiiveys vaikuttaa heikentävästi deformaatiokestävyyteen ja jäykkyyteen. Kokemusperäisten kaavojen mukainen lisäbitumipitoisuus johti deformaatioherkkiin massoihin. Tästä syystä REST-massoille tehtiin deformaatiokokeita myös alhaisemmilla (työmaakäytäntöä vastaavalla) tehollisella kokonaisbitumipitoisuudella. Nämä REST-massat täyttivät deformaatioluokan I vaatimuksen.

Taulukko 30. VBST-, REST- ja KOST-stabilointien perusvaihtoehtojen toiminnalliset ominaisuudet (keskiarvot).

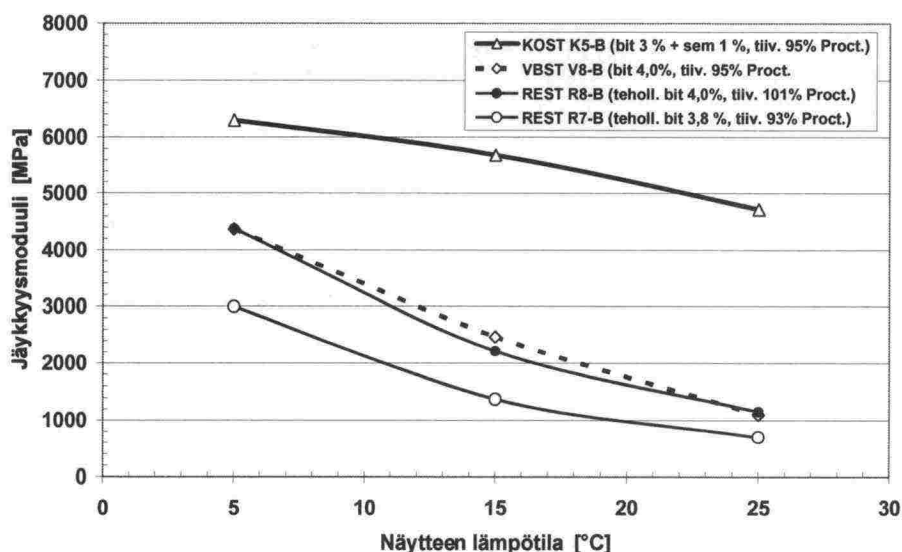
		Ikä		VBST		REST		KOST	
OMINAISUUS	°C	vrk	Yks	V8-B	V9-B	R7-B	R8-B	K5-B	K6-B
<b>Tavoitetiiveyden valintamenetelmä</b>				<i>Proctor</i>	<i>ICT</i>	<i>Proctor</i>	<i>ICT</i>	<i>Proctor</i>	<i>ICT</i>
<b>VEDENKESTÄVYYS</b>									
Halkaisuvetolujuus, kuiva	10	31	kPa	974		322	797	785	
Halkaisuvetolujuus, märkä	10	31	kPa	574		206	598	567	
Halkaisuvetojäykkyys, kuiva	10	31	MPa	105		28	79	182	
Halkaisuvetojäykkyys, märkä	10	31	MPa	69		18	54	134	
Vedenkestävyys (HVL), PANK 4301	10	31	%	<b>59</b>		<b>64</b>	<b>75</b>	<b>72</b>	
Vedenkestävyys (HVJ)	10	31	%	66		63	68	74	
<b>PAKKASENKESTÄVYYS</b>									
Halkaisuvetolujuus, refer.	10	60	kPa	948		338	823	772	
Halkaisuvetolujuus, pakkasv.	10	60	kPa	586		235	653	582	
Halkaisuvetojäykkyys, refer.	10	60	MPa	94		28	73	189	
Halkaisuvetojäykkyys, pakkasv.	10	60	MPa	59		19	56	114	
Pakkasenkestävyys (HVL)		60	%	<b>62</b>		<b>70</b>	<b>79</b>	<b>75</b>	
Pakkasenkestävyys (HVJ)		60	%	63		67	77	60	
<b>PAKKAS-SUOLAKESTÄVYYS</b>									
Halkaisuvetoluj., refer., märkä	10	42	kPa		735		763		593
Halkaisuvetoluj., pakkas-suolav.	10	42	kPa		484		577		456
Halk.vetojäykk., refer.	10	42	MPa		82		67		134
Halk.vetojäykk., pakkas-suolav.	10	42	MPa		40		50		78
Siirtymä murtohetkellä, refer.		42	mm		2,1		2,7		1,0
Siirtymä murtohetkellä, vanh.		42	mm		2,9		2,8		1,4
Pakkas-suolakestävyys (HVL)		42	%		<b>66</b>		<b>76</b>		<b>77</b>
Pakkas-suolakestävyys (HVJ)		42	%		49		74		58
<b>DEFORM.KESTÄVYYS (creep)</b>	40	28	%	0,5			1,1 *)	0,04	
<b>JÄYKKYYSMODUULI <math>M_{rk}</math></b> (dyn., 1-aksiaalinen koe)	5	28	MPa	4372		2995	4381	6287	
	15	29	MPa	2472		1374	2219	5688	
	25	30	MPa	1101		698	1155	4717	
<b>KOOSTUMUSTIETOJA</b>									
- rakeisuuskäyrä				B	B	B	B	B	B
- PAB-B-rouhetta (kivien + rouheen määrästä)			%	0	0	50 erä 1	50 erä 2	0	0
- tyhjätila			%		12,4	17,1	9,6		14,5
- teholl. kokonaisbit.pit., B160/220			%	4,0	4,0	3,8	4,0	3,0	3,0
- tartukepitoisuus % bit. määrästä			%	0,5	0,5				
- SR-sementtipitoisuus			%					1,0	1,0
- kokonaisvesipitoisuus			%	2,5	2,5	2,6	4,2	3,2	3,2
- kuivairtoiheys (sis. bit. ja sem.)			kg/m3	2234	2216	2063	2264	2242	2191
- tiiveys, (% Proctorista)			%	95	94	93	101	95	93
- tiiveys, (% ICT 200r tiiv.)			%		96		96		96

\*) alempi tehollinen kokonaisbitumipitoisuus 3,3 %.

Kuvan 15 mukaan REST- ja vaahtobitumistabilointien perusvaihtoehdot hyvin tiivistettyinä vastasivat jäykkyydeltään toisiaan sekä jäykkyyden tason että sen lämpötilaherkkyyden osalta. Kun REST-massan tiiveys aleni 101 → 94 %:iin Proctor-tiiveydestä, aleni jäykkyydsmoduuli merkittävästi.

Komposiittistabiloinnin perusvaihtoehdon jäykkyys oli korkea ja sen lämpötilaherkkyys vähäisempi verrattuna bitumilla sidottuihin stabilointeihin:

- Lämpötilassa 5 °C komposiitti oli noin 1,4 kertaa niin jäykkää kuin vaahtobitumi- tai Remix-stabilointi ja lämpötilassa 25 °C komposiitin jäykkyys oli yli 4-kertainen pelkällä bitumilla sidottuihin vaihtoehtoihin verrattuna.
- Kun lämpötila nousi 5 °C:sta 25 °C:een, komposiitin jäykkyydsmoduuli aleni noin 25%, mutta VBST:n ja REST:in vastaava muutos oli noin 75 %.



Kuva 15. Perusvaihtoehtojen mukaisten stabilointikoostumusten jäykkyydsmoduulin riippuvuus lämpötilasta ja tiiveydestä (rakeisuus B, bitumi B160/220)

Kuvassa 16 on esitetty syklisen pakkas-suolarasituksen aiheuttama muutos eri stabilointityyppien perusmassakoostumuksen mukaisiin näytteisiin. Kuvan perusteella voidaan havaita, että pakkas-suolarasituksen vaikutuksesta:

- KOST- ja REST- massan lujuuden alenemat pakkas-suolarasituksen vaikutuksesta olivat keskenään samaa tasoa ja hieman pienemmät kuin VBST-massalla,
- REST-massan halkaisuvetojäykkyys aleni vähiten ja VBST-massan eniten,
- pakkas-suolarasitettujen näytteiden ja vertailunäytteiden maksimimuodonmuutos puristuslujuudessa (puristusleukojen siirtymä murtohetkellä) oli eri perusmassatyypeillä taulukon 31 mukainen eli massatyyppistä riippuen ennen pakka-suolakoestusta noin 1-2 mm ja sen jälkeen noin 1,5 – 3 mm. Vertailunäytteistä kesti suurimman muodonmuutoksen puristuslujuudessa ennen murtoa REST ja vähiten muodonmuutosta kesti KOST. Halkaisuvetokokeen aikana puristusleuat osittain kuitenkin uppoavat näytteeseen ennen murtoa ja tältä osin on kyse massan plastisesta deformaatiosta (mitä pehmeämpi massa, sitä enemmän puristusleuat uppoavat



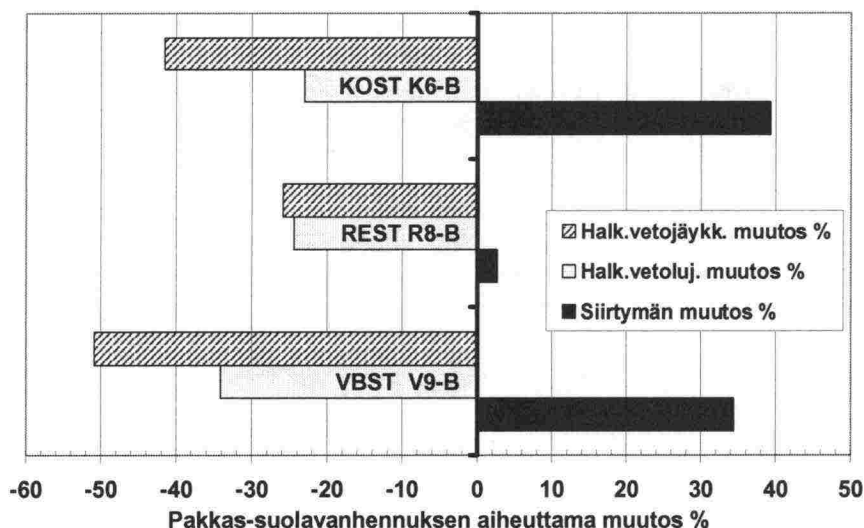
näytteen pintaan). Teoreettisesti oikeampi tapa olisi mitata muodonmuutoskestävyys kohtisuoraan puristussuuntaa vastaan. Tämä olisi mahdollista tehdä asentamalla näytteen päihin ennen koestusta vaakasuoran siirtymän mittaavat anturit. Tehdyssä kokeessa ei ollut varauduttu tähän mitaukseen, koska se ei sisältynyt mittausmenetelmään.

- Pakkas-suolarasituksen vaikutuksesta REST-massan muodonmuutoksenkestävyysominaisuudet puristussuunnassa eivät muuttuneet olennaisesti. Sen sijaan KOST- ja VBST-massan muodonmuutos ennen murtoa kasvoi 32-40 % ennen murtoa pakkas-suolarasituksen vaikutuksesta, taul. 31 ja kuva 16.

Taulukko 31. Peruskoostumusten muodonmuutoskestävyys halkaisuvetojuuskokeessa ennen ja jälkeen pakkas-suolarasituksen (tiiveys 96 % ICT 200 r tiiveydestä,  $T = 10\text{ °C}$ ).

Näyte	Puristusleukojen maks. siirtymä [mm] HVL-kokeessa		
	VBST V9-B	REST R8-B	KOST K6-B
Vanhentamattomat	2,1	2,7	1,0
Pakkas-suolavanhennetut	2,9	2,8	1,4

VBST-massa ei sisältänyt näissä laboratoriokokeissa asfalttirouhetta kuten yleensä tieolosuhteissa toteutetuissa vaahtobitumistabilointikohteissa. Tästä syystä tulosta ei voida suoraan yleistää tieolosuhteissa tehdyn stabiloinnin pakkas-suolakestävyyteen.



Kuva 16. Pakkas-suolavanhennuksen (koestuksen) aiheuttama muutos VBST-, REST- ja KOST-perusmassojen halkaisuvetojuusominaisuuksiin,  $T = 10\text{ °C}$ .



### **3.2.3 Toiminnalliset ominaisuudet massatyypeittäin**

#### **3.2.3.1 Vaahtobitumistabiloinnin ominaisuudet**

Vaahtobitumistabilointimassan tutkittujen koostumusten keskiarvotulokset on esitetty taulukossa 32 ja yksittäisten näytteiden tulokset liitteissä 15a-c, 18, 21, 22 ja 25a-b.

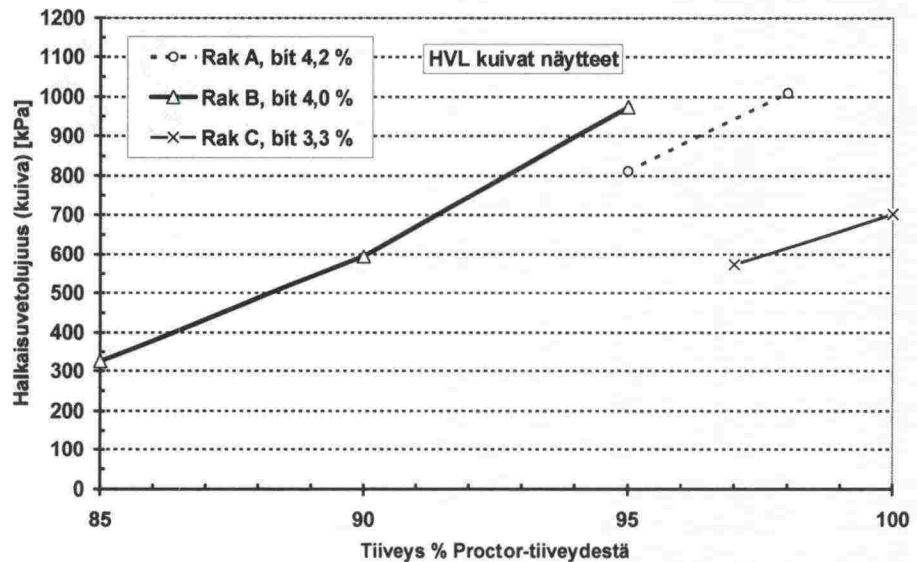
Taulukko 32. VBST-stabilointimassan eri koostumusten V1-A... V12-C toiminnalliset ominaisuudet (keskiarvot)

		VBST - koostumusvaihtoehdot																						
		ylärajakäyrä A			enemmän bit.		vähän bit.		löyhempi		perusratkaisu		enemm. bit.		lämmin sek.		rouhe		kova bit.		pehm. bit		alarajakäyrä C	
		V1-A	V2-A	V3-A	V4-A	V5-B	V6-B	V7-B	V8-B	V9-B	V10-B	V11-B	V12-B	V13-B	V14-B	V15-C	V16-C							
OMINAISUUS																								
Vedenkestävyys (HVL)	%	10 (HVL)	49	55	59	50	46	43	48	59	69	75	59	50	93	69	69							
Vedenkestävyys (HVJ)	%	10 (HVJ)	53	55	59	57	47	47	50	66	81	79	66	53	65	71	69							
HVL, kuiva	kPa	10	1009	812	1249	1072	832	325	595	974	1034	1012	838	929	330	702	574							
HVL, märkä	kPa	10	495	450	739	533	385	141	287	574	715	755	492	461	306	487	398							
HVjäykkyys, kuiva	MPa	10	117	91	130	111	106	31	61	105	92	95	81	126	33	81	49							
HVjäykkyys, märkä	MPa	10	62	50	77	63	50	14	30	69	75	75	53	67	21	57	34							
Pakkasenkestävyys (HVL)	%		71							62					80	97	91							
Pakkasenkestävyys (HVJ)	%		61							63					66	89	86							
HVL refer., märkä	kPa	10	992							948					679	407	761							
HVL pakkasv., märkä	kPa	10	709							586					545	393	692							
HVjäykk. refer., märkä	MPa	10	115							94					96	36	81							
HVjäykk. pakkasv., märkä	MPa	10	70							59					63	32	69							
Suola-pakkasenkestävyys	%									66														
Deform.kest. (creep)	%	40	0,4		0,7					0,5	- *)	2,0			- *)	0,4								
Dyn. jäykkyyshmoduuli Mrk (1-akselial.)		5								4372	3070			3228	2112									
	MPa	15	2066	1590	2223		2134	978	1603	2472	1849	2454	2138	1764	2429	859	1542	1229						
		25								1101	1154			1636	542									
KOOSTUMUS																								
Rakeisuuskäyrä			A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	C	C							
PAB-B-rouhepitols., erä 1	%		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0							
Bitumilaji		B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B 70/100	B650/900	B160/220	B160/220							
Kokonaisbitumipitoisuus	%	4,2	4,2	5,2	5,2	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0	5,0	4,5	4,4**)	4,0	4,0	3,3	3,3							
Tartuke % lisäbitumista	%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5							
Vesipitoisuus	%	2,5	2,5	2,5	2,5	2,6	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,8	2,8							
Sekoituslämpötila,	°C	20-23	20-23	20-23	20-23	20-23	20-23	20-23	20-23	20-23	20-23	60	20-23	20-23	20-23	20-23	20-23							
Kuivairtoiheys (bit. mukana)	kg/m3	2239	2181	2262	2202	2222	1999	2116	2234	2216	2258	2246	2200	2234	2234	2218	2095							
tiiveys % Proctor-tiiveydestä	%	98	95	98	95	95	85	90	95	94	95	95	95	95	95	100	97							
tiiveys % ICT 200r-tiiveydestä	%		96		96					96							96							

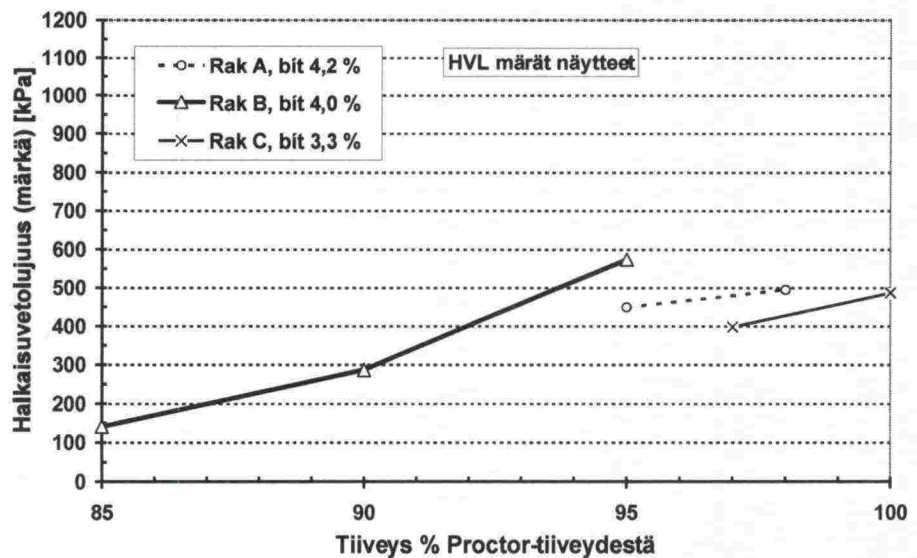
\*) Näyte murtui kokeen aikana, \*\*) V12-B bitumipitoisuus sisältää 1 %-yksikön rouheen tehollista bitumia.  
HVL = halkaisuvetolujuus, HVJ = halkaisuvetojäykkyys

### Vedenkestävyys VBST

Vaahto-bitumistabiloinnin vedenkestävyys tutkittiin halkaisuvetolujuuteen perustuvalla kokeella, jonka tuloksena saadaan selville märkinä ja kuivina koestettujen näytteiden halkaisuvetolujuudet ja niiden suhteen perusteella vedenkestävyys, kuva 17-19.

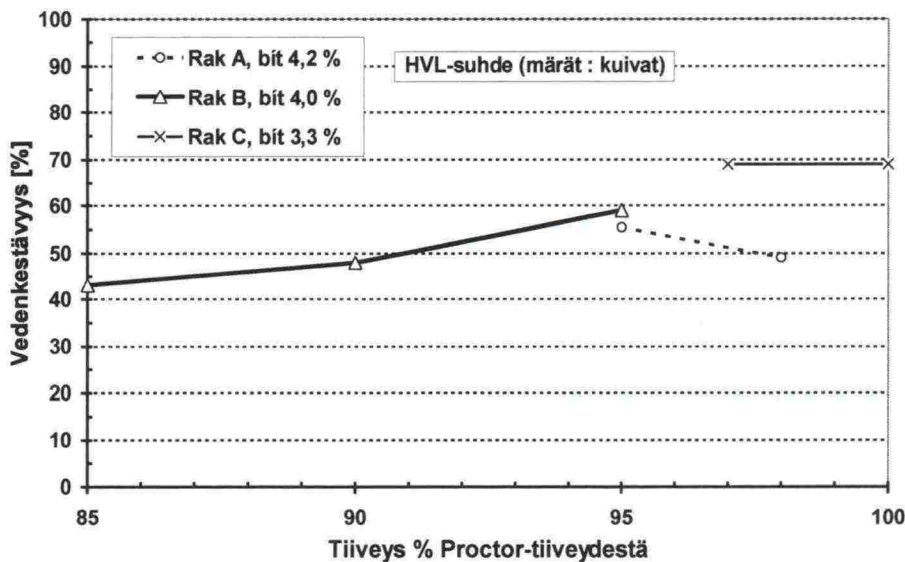


Kuva 17. VBST-massan kuivien näytteiden halkaisuvetolujuuden riippuvuus massan koostumuksesta ja tiiveydestä ( $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



Kuva 18. VBST-massan märkien näytteiden halkaisuvetolujuuden riippuvuus massan koostumuksesta ja tiiveydestä ( $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



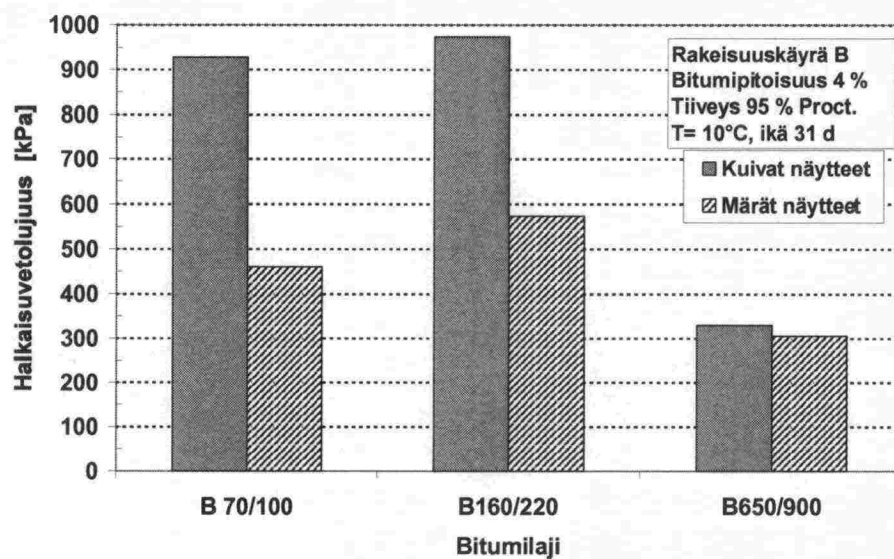


Kuva 19. VBST-massan vedenkestävyyden riippuvuus massan koostumuksesta ja tiiveydestä ( $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ikä 31 d).

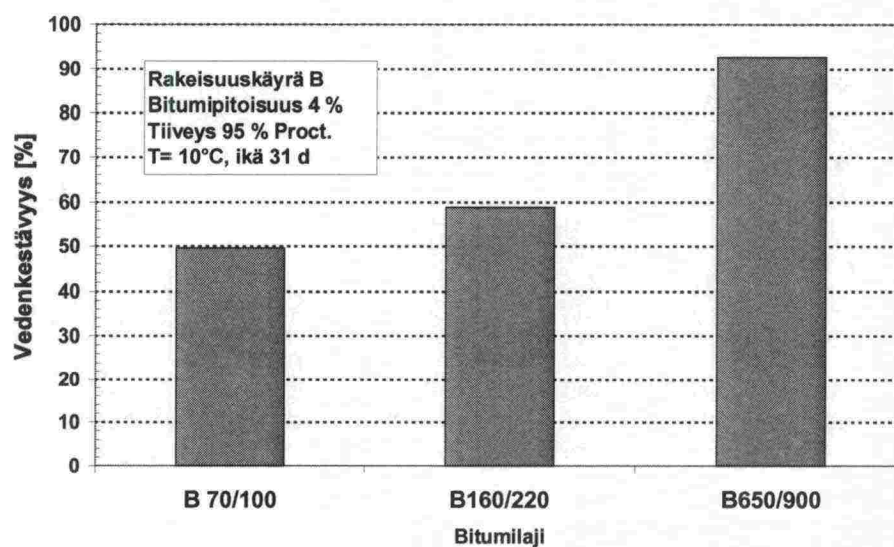
Kuvien 18 ja 19 mukaan vaahtobitumistabiloinnin kuivina tutkittujen näytteiden halkaisuvetolujuus riippui merkittävästi näytteiden tiiveydestä ja rakeisuudesta, lujuus kasvoi tiiveyden kasvaessa. Myös märillä näytteillä tiiveys vaikutti merkittävästi lujuuteen. Sen sijaan vedenkestävyys, joka laskettiin näiden samojen näytteiden halkaisuvetolujuuksien keskiarvojen perusteella, vaihteli vähemmän. Lujuuden suuresta alenemasta huolimatta vedenkestävyyssluuku säilyi Stabilointiohjeen tarttuvuusluvun ohjearvon ( $> 40\%$ ) yläpuolella.

Bitumia B160/220 käytettäessä oli vaahtobitumistabilointimassan halkaisuvetolujuus ( $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ :ssa) lievästi suurempi kuin kovemmalla bitumilla B70/100 ja merkittävästi suurempi kuin pehmeällä bitumilla B650/900. Kovan bitumin käyttö ei siten parantanut massan lujuutta, mikä saattaa johtua sen heikommasta sekoituvuudesta. Pehmeintä bitumilajia käytettäessä massa on pehmeämpää, mikä heikentää sen lujuutta, kuva 20.

Mitä pehmeämpää bitumia käytettiin, sitä parempi oli VBST-massan vedenkestävyysarvo. Vesi heikensi pehmeää bitumia (B650/900) käytettäessä vain vähän massan lujuutta. On kuitenkin huomattava, että pehmeintä bitumia (B650/900) käytettäessä massan halkaisuvetolujuus sekä kuivana että märkänä oli olennaisesti alhaisempi kuin kovempaa bitumia käytettäessä, kuva 21.



Kuva 20. VBST-massan halkaisuvetolujuuden riippuvuus bitumilajista.



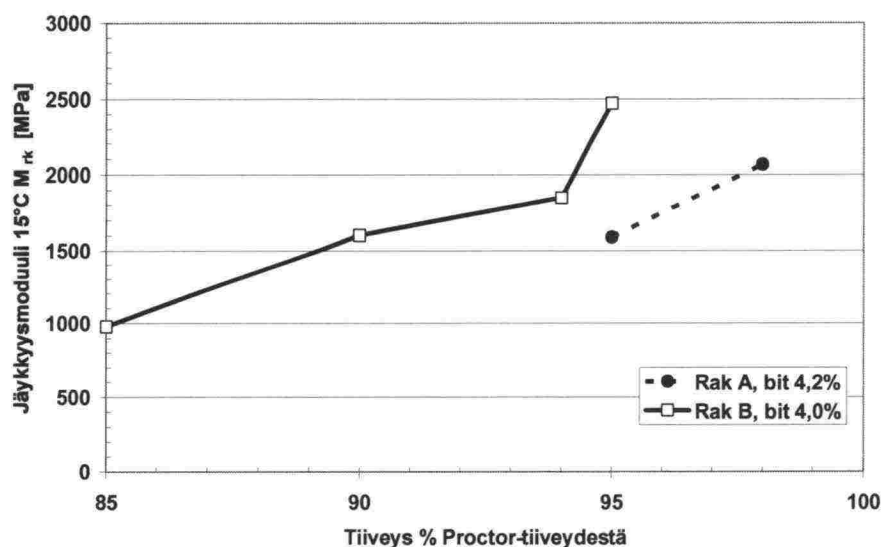
Kuva 21. VBST-massan vedenkestävyyden riippuvuus bitumilajista (Tarttuvuusluku).

Vaahto-bitumistabiloinnin kuivina tutkittujen näytteiden halkaisuvetojäykkyys (10 °C:ssa) alenee selkeästi bitumin vaihtuessa pehmeämpään lajiin. Märkinä koestettujen näytteiden kohdalla näin ei aina tapahdu, koska heikko vedenkestävyys heikentää tartuntaa. Merkille pantavaa oli, että bitumeilla B160/220 saavutettiin jopa lievästi suurempi halkaisuvetojäykkyys kuin kovemmalla bitumilla B70/100.

**Jäykkyys (VBST)**

Vaahto-bitumistabilointinäytteiden jäykkyyshuomion riippuvuus lämpötilasta tutkittiin yksiakselisella dynaamisella kokeella kolmea eri bitumilajia käyttäen.

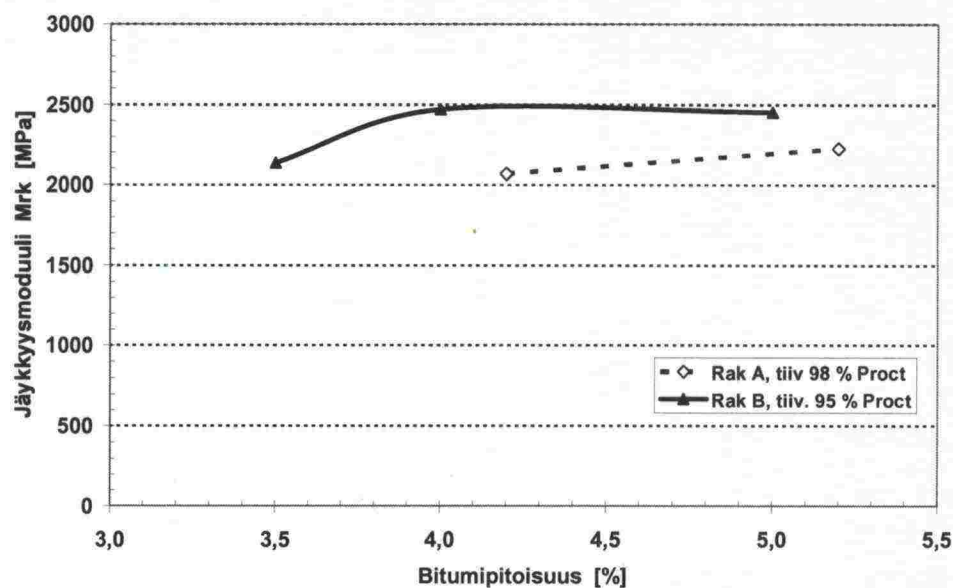
Tiveys vaikutti merkittävästi massan jäykkyyteen. Kun VBST-massan tiveys muuttui (koostumusten V6-B, V7-B, V9-B ja V8-B mukaisesti) sarjassa 85 % → 90 % → 94 % → 95 % Proctor-tiiveydestä, muuttui jäykkyys lämpötilassa 15 °C:ssa vastaavasti sarjassa 980 → 1600 → 1850 → 2470 MPa, kuva 22.



Kuva 22. VBST-massan jäykkyyden riippuvuus tiiveydestä.

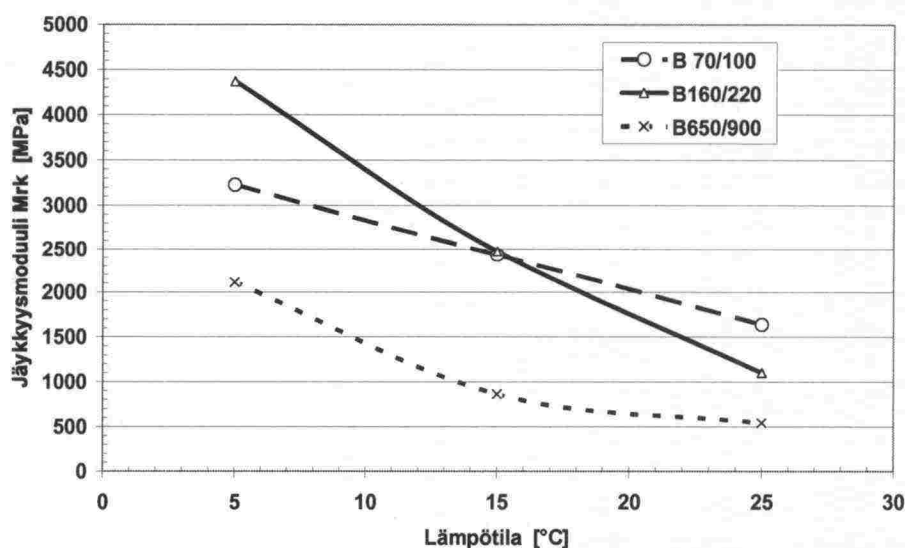
Jäykkyyshuomion riippuvuus bitumipitoisuudesta on esitetty kuvassa 23. Bitumipitoisuuden lisäys nostaa jäykkyyttä tiettyynajaan saakka, esim. rakeisuudella B jäykkyys kasvoi sideainepitoisuuden noustessa noin 4,2 %:n pitoisuuteen, mutta ei enää sen jälkeen. Rakeisuudella A kasvoi jäykkyys vielä vähäisessä määrin bitumipitoisuuden noustessa yhden %-yksikön yli kokeusperäisen kaavan mukaisen ohjearvon. Rakeisuuden A mukaisen massan jäykkyys oli alhaisempi kuin rakeisuuden B mukaisella massalla huolimatta siitä, että rakeisuudella A valmistetut näytteet olivat tiiviimpiä.





Kuva 23. VBST-massan jäykkyyden riippuvuus bitumipitoisuudesta (bit B160/220,  $T = 15^{\circ}\text{C}$ )

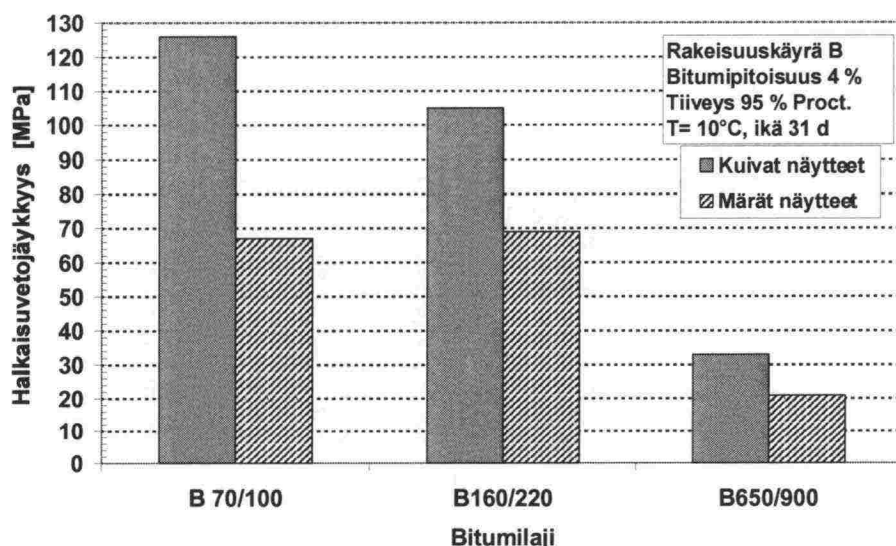
Jäykkyyshmoduulin riippuvuus lämpötilasta on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. VBST:n massan jäykkyyshmoduulin riippuvuus lämpötilasta (rakeisuus B, bitumipit. 4 %).

Kovempaa bitumia käytettäessä on bitumilla sidottu kerros yleensä jäykempää kuin pehmeää bitumia käytettäessä. Bitumien B 70/220 ja B 160/220 lämpötila – moduulikuvaajat leikkaavat toisensa kuvassa 24. Tähän voi olla syynä näytteiden epähomogeenisuus. Kova bitumi sekoittuu huonommin kiviainekseen kuin pehmeä bitumi. Tämä saattaa olla selitys siihen, että massan jäykkyys oli viileässä bitumilla B70/100 heikompi kuin bitumia B160/220 käytettäessä.

Kuvassa 25 on esitetty lämpötilassa 10 °C määritetyt näytteiden halkaisuvetojäykkyydet samoilla bitumeilla. Tässä kokeessa jäykempi bitumi tuotti suuremman jäykkyyden kuivilla näytteillä. Märkinä halkaistuilla näytteillä kahden kovimman bitumin käyttö johti samaa tasoa oleviin halkaisuvetojäykkyyksiin.



Kuva 25. VBST-massan halkaisuvetojäykkyyden riippuvuus bitumilajista.

### **Pakkasenkestävyys ja suola-pakkaskestävyys (VBST)**

Rakeisuuden B mukaisen perusmassan pakkasenkestävyys oli noin 62 % vertailulujuudesta ja suola-pakkaskestävyys noin 66 % vertailulujuudesta (bitumi B160/220 ja tiiveys 94-95 % Proctor-tiiveydestä).

Pakkasenkestävyys parani, kun massan tiiviys parani. Paras pakkasenkestävyys saavutettiin pehmeimmällä bitumilla.

### **Deformaatiokestävyys (VBST)**

Kokemusperäisen kaavan mukaisella bitumipitoisuudella valmistettu massa bitumilla B160/220 oli deformaatiota kestävä. Kun bitumipitoisuutta nostettiin 1 %-yksikön yli tämän tason tai käytettiin pehmeämpää bitumia (B650/900), massa ei kestänyt deformaatiokokeessa lämpötilassa 40 °C.

### **3.2.3.2 REST-massan ominaisuudet**

#### **Yleistä**

REST-massan toiminnallisina ominaisuuksina tutkittiin vedenkestävyys, pakkasenkestävyys, suola-pakkaskestävyys, deformaatiokestävyys ja dynaaminen jäykkyyssmoduuli. Tutkittujen koostumusten keskiarvotulokset on esitetty taulukossa 33 ja yksittäisten näytteiden tulokset liitteissä 16a-b, 19, 21, 23 ja 26.

Kaikkien REST-koostumusten bituminen sideaine oli bitumiemulsiota (pohjabitumi B160/220). Tartuketta ei käytetty. Rouhe ja bitumi lisättiin seokseen lämpiminä. Laajimmat tutkimukset tehtiin rakeisuuden B mukaisilla massoilla.

Ensi vaiheen kokeita täydennettiin lisäkokein, joilla pyrittiin selvittämään tiiveyden ja bitumipitoisuuden vaikutusta deformaatio-ominaisuuksiin, jäykkyyteen ja lujuuteen. Lisäkokeissa käytetyn PAB-B-rouheen (toimituserän 2) bitumi oli pehmeämpää ja bitumipitoisuus alhaisempi kuin aiemmissa kokeissa käytetyn (toimituserän 1) PAB-rouheen vastaavat arvot. Lisäkokeissa valittiin tavoitettiiveys ICT-laitteella tehtyjen tiivistyskokeiden jälkeen.

### **Vedenkestävyys (REST)**

Vedenkestävyys tutkittiin märkinä ja kuivina koestettujen näytteiden halkaisuvetolujuuksien suhteen perusteella lämpötilassa 10 °C.

Rakeisuuden vaikutus vedenkestävyyteen tutkittiin vertaamalla toisiinsa kunakin rakeisuuden (A – C) REST-massoja useilla tiiveystasoilla.

A- ja B-rakeisuuksien mukaisten massojen vedenkestävyys tutkittiin ensin tiiveystasolla 93-94 % Proctor-tiiveydestä ja sen jälkeen lisäkokeissa tiiveystasolla 101 % Proctor-tiiveydestä. Alemmalla tiiveydellä valmistetuissa näytteissä massaan lisättävä bitumipitoisuus oli 0,2 %-yksikköä alle kokemuseräisen kaavan mukaisen ohjeellisen lisäbitumipitoisuuden. Vähiten hienoainesta sisältävän rakeisuuden C-mukaisen massan bitumipitoisuus oli 0,2 %-yksikköä yli kokemuseräisen kaavan mukaisen ohjeellisen pitoisuuden.

Rakeisuus vaikutti vedenkestävyyteen tiiveystasolla 93-94 % Proctor-tiiveydestä siten, että:

- vedenkestävyydeltään paras oli koostumus R14-C (rakeisuus C, tarttuvuusluku 73 %).
- toiseksi paras vedenkestävyydeltään oli rakeisuuden B mukainen koostumus (R7-B), tarttuvuusluku 64 % ja
- heikoin vedenkestävyys oli eniten hienoainesta sisältävällä rakeisuudella A, (R1-A), tarttuvuusluku 44 %, taul. 33.

Vedenkestävyytuloksia heikensi ensi vaiheen kokeissa näytteiden alhainen tiiveys ja massan R14-B osalta sitä paransi rakeisuuteen verrattuna korkea bitumipitoisuus.

Lisäkokeissa (massat R2-A ja R8-B) oli näytteiden tiiveys 96 % ICT 200 r kierrosta tiivistettyjen näytteiden tiiveydestä, mikä vastasi noin 101 % Proctor-tiiveydestä. Näissä uusinnoissa vedenkestävyytuloksia oli merkittävästi parempi: A-rakeisuudella tarttuvuusluku oli 65 % ja B-rakeisuudella vastaava arvo oli 75 %.



Taulukko 33. REST-massan eri koostumusten R1-A...R16-C toiminnalliset ominaisuudet (keskiarvot), bitumipohja B 160/220.

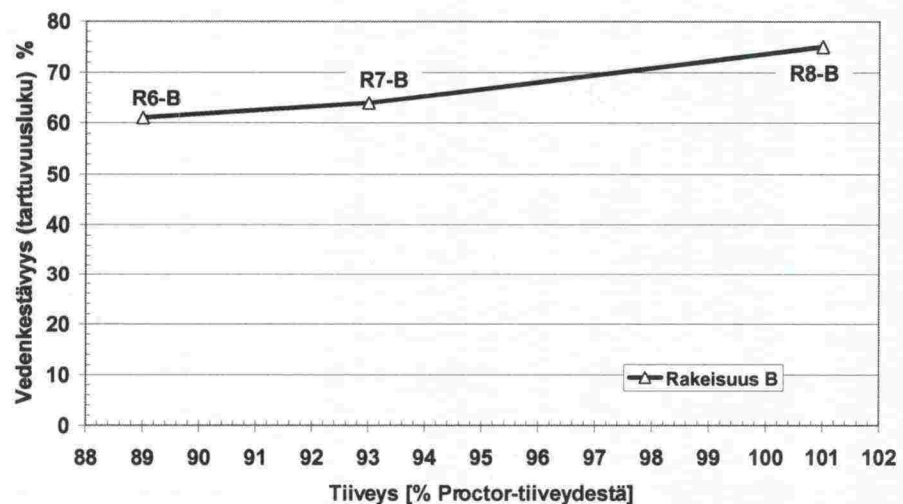
Koostumusvaihtoehdot																					
		Lämpö- tila	ylärajakäyrä A		vähän bit.		vähän bit.	löyhin	perusvaihtoehto		vähän bit.		enemm. bit.	vähän rouh	AB- rouhe	alaraja- käyrä C	vähän bit.				
			R1-A	R2-A	R3-A	R4-A			R5-B	R6-B	R7-B	R8-B					R9-B	R10-B	R11-B	R12-B	R13-B
		°C																			
		%	10 (HVL)	44	65			46	61	64	75			75	72	62	73				
		%	10 (HVJ)	43	67			41	72	63	68			79	81	67	73				
		kPa	10	400	850			292	219	322	797			503	543	614	548				
		kPa	10	176	550			134	134	206	598			378	390	379	402				
		MPa	10	36	76			29	19	28	79			37	37	58	55				
		MPa	10	15	51			12	14	18	54			29	30	39	40				
		%		73						70							73				
		%		58						67							76				
		kPa	10	310						338							478				
		kPa	10	228						235							349				
		MPa	10	29						28							39				
		MPa	10	17						19							30				
		%									76										
		%	40	-*)	-*)	0,5	0,4			-*)	-*)	1,1	0,6	-*)		-*)	1,0	0,7			
			5							2995	4381										
		MPa	15	1092	1574			1012	930	1374	2219			1392	1263	2102	1330				
			25							698	1155										
				A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	C	C	C			
				PAB-B erä 1	PAB-B erä 2	PAB-B erä 2	PAB-B erä 2	PAB-B erä 1	PAB-B erä 1	PAB-B erä 1	PAB-B erä 2	PAB-B erä 1	PAB-B erä 2	PAB-B erä 1	AB	PAB-B, erä 1	PAB-B erä 2	PAB-B erä 2			
				50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	25 %	25 %	25 %		
				2,3	2,8	3,0	2,9	2,0	2,0	2,0	2,7	2,7	2,6	2,0	2,2	2,3	2,6	2,6			
		%	ohi-0,2	ohi.+0,2	ohi-1,0	ohi-1,2	ohi-0,7	ohi-0,2	ohi-0,2	ohi-0,2	ohieell.	ohi-0,7	ohi-1,2	ohi+0,8	ohi-0,2	ohi+0,2	ohi-0,7	ohi-1,3			
		%	2,1	3,0	2,0	1,7	1,3	1,8	1,8	1,8	2,7	2,0	1,4	2,8	2,0	2,5	1,9	1,3			
		%	4,1	4,3	3,3	3,0	3,3	3,8	3,8	3,8	4,0	3,3	2,8	4,8	4,6	3,7	3,5	2,0			
		%	4,3	4,4	3,4	3,1	3,5	4,0	4,0	4,0	4,1	3,4	2,9	5,0	4,7	4,5	3,6	2,1			
		%	2,8	4,4	3,7	3,5	2,3	2,6	2,6	2,6	4,2	3,7	3,4	3,3	4,5	2,8	3,8	3,6			
		kg/m3	2074	2244	2266	2268	2052	1971	2063	2264	2264	2264	2269	2091	2083	2071	2058	2134	2133		
		%	94	101			93	89	93	101	96	96	96	93	92	93	94	96	96		
		%			97	97															

\*) Näyte murtui kokeen aikana \*\*) Rouhepitoisuus on laskettu rouheen ja kiviaineksen summasta \*\*\*) Lisävesi + emulsion vesi

Bitumipitoisuuden vaikutus vedenkestävyyteen tutkittiin vertaamalla toisiinsa kolmea rakeisuutta B olevaa REST-massaa (R5-B, R7-B ja R11-B). Kun massan tehollista bitumipitoisuutta nostettiin sarjassa 3,3 % → 3,8 % → 4,8 %, muuttui Remix-stabiloinnin vedenkestävyys vastaavasti sarjassa 46 % → 64 % → 75 % (tiiveystasolla 93 % Proctor-tiiveydestä).

Rouhelajin vaikutus vedenkestävyyteen tutkittiin kahden rakeisuutta B olevan erilaista rouhemateriaalia sisältävän REST-massan (R7-B ja R13-B) perusteella. Ensin mainittu sisälsi PAB-rouhetta 50 % rouheen ja kiviaineksen yhteismassasta ja jälkimmäinen 50 % AB-rouhetta. Tiiveystasolla 93 % Proctor-tiiveydestä näiden massojen vedenkestävyydet (tarttuvuusluvut) olivat samaa tasoa (62 – 64 %).

Näytteen tiiveyden vaikutus vedenkestävyyteen tutkittiin vertaamalla keskenään kolmea rakeisuuden B mukaista REST-massaa (R6-B, R7-B ja R8-B). Näiden massojen tiiveydellä oli suhteellisen vähän vaikutusta vedenkestävyyteen. Kun tiiveys muuttui sarjassa 89 % → 93 % → 101 % Proctor-tiiveydestä, muuttui vedenkestävyys sarjassa 61 % → 64 % → 75 %. Tämän sarjan tiiveimmissä näytteissä oli tehollinen bitumipitoisuus oli valittu 0,2 %-yksikköä (kokonaisbitumipitoisuus 0,1 %-yksikköä) korkeammaksi kuin muissa näytteissä, mikä paransi tiiveimpien näytteiden vedenkestävyyttä, kuva 26.



Kuva 26. REST-massan vedenkestävyyden riippuvuus tiiveydestä.

### **Pakkasenkestävyys (REST)**

Pakkasenkestävyys tutkittiin syklisen jäädytys-sulatuskokeen avulla kohdan 2.3.9 mukaisesti. Jäädytys-sulatusrasituksessa olleille näytteille ja niiden vertailunäytteille tehtiin kohdan 2.3.4 mukainen halkaisuvetolujuuskoe vesiupotuksen jälkeen 10 °C:ssa.

Rakeisuuden vaikutus pakkasenkestävyyteen tutkittiin vertaamalla toisiinsa kolmea rakeisuuden (A – C) mukaista REST-massaa (R1-A, R7-B ja R14-C).

Tiiveystasolla 93-94 % Proctor-tiiveydestä tutkittujen REST-massojen pakkasenkestävyydellä ei ollut rakeisuudesta riippuvia merkittäviä eroja. Rakeisuuden A ja C näytteiden halkaisuvetolujuus pakkasrasituksen jälkeen oli 73 % vertailulujuudesta ja rakeisuuden B vastaava arvo oli 70 %, joten massat olivat pakkasenkestäviä, taul. 33.

### **Suola-pakkaskestävyys (REST)**

Suola-pakkaskestävyys tutkittiin kohdan 2.3.10 mukaisesti. Suola-pakkasrasituksen jälkeen REST-näytteille ja niiden vertailunäytteille tehtiin kohdan 2.3.4 mukainen halkaisuvetolujuuskoe vesiupotuksen jälkeen 10 °C:ssa.

Suola-pakkaskestävyys tutkittiin vain perusvaihtoehdon mukaisella koostumuksella R8-B (tiiveys 96 % ICT 200 r vastaavasta tiiveydestä). Näytteiden halkaisuvetolujuus syklisen suola-pakkasrasituksen jälkeen oli 76 % vertailulujuudesta eli suola-pakkasrasitus alensi halkaisuvetolujuutta 24 %.

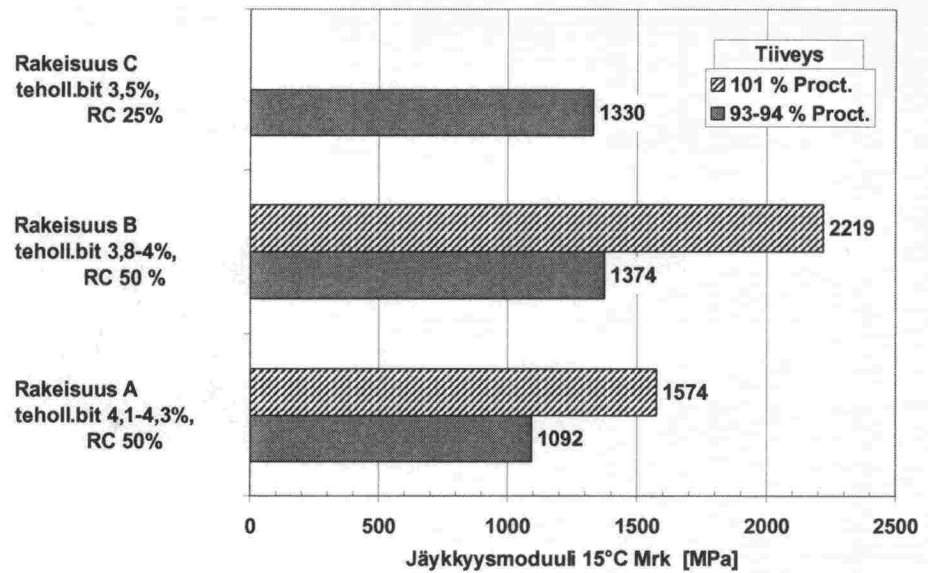
### **Jäykkyyshmoduuli (REST)**

REST-massan jäykkyyshmoduulin riippuvuus massan rakeisuudesta, bitumipitoisuudesta, rouheen käytöstä ja tiiveydestä tutkittiin (15 °C:ssa) dynaamisella, yksiaksiaaliseen puristukseen perustuvalla menetelmällä kohdan 2.3.8 mukaisesti.

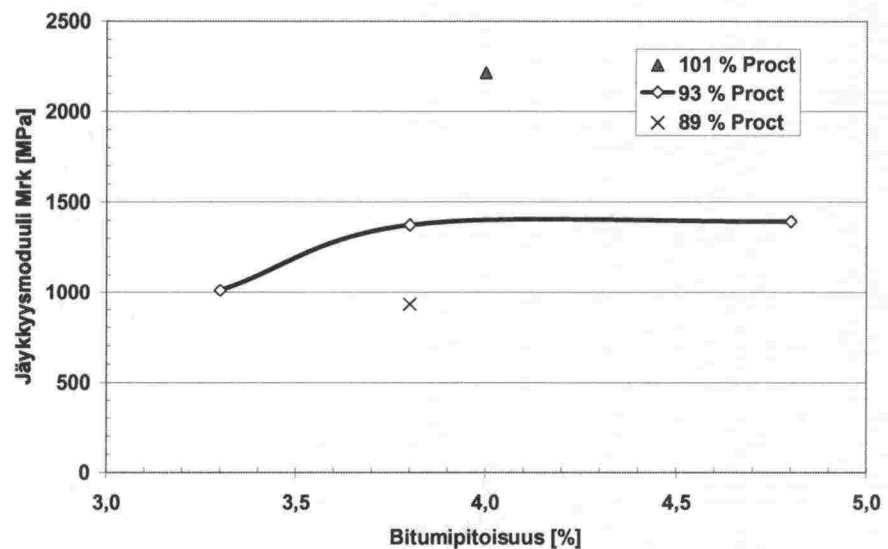
Rakeisuuden vaikutus jäykkyyshmoduuliin tutkittiin vertaamalla toisiinsa kunkin rakeisuuden (A – C) REST-massoja. Tiiveystasolla 93-94 % Proctor-tiiveydestä korkein jäykkyys (1330-1370 MPa) oli rakeisuuden B mukaisella massalla ja rakeisuuden C omaavalla koostumuksella, kuva 27.

Bitumipitoisuuden ja tiiveyden vaikutus jäykkyyshmoduuliin tutkittiin vertaamalla toisiinsa rakeisuuden B mukaisia REST-massoja. Tehollisen bitumipitoisuuden lisäys yli tietyn rajan (noin 4 %) ei enää lisännyt massan jäykkyyttä, kuva 28.



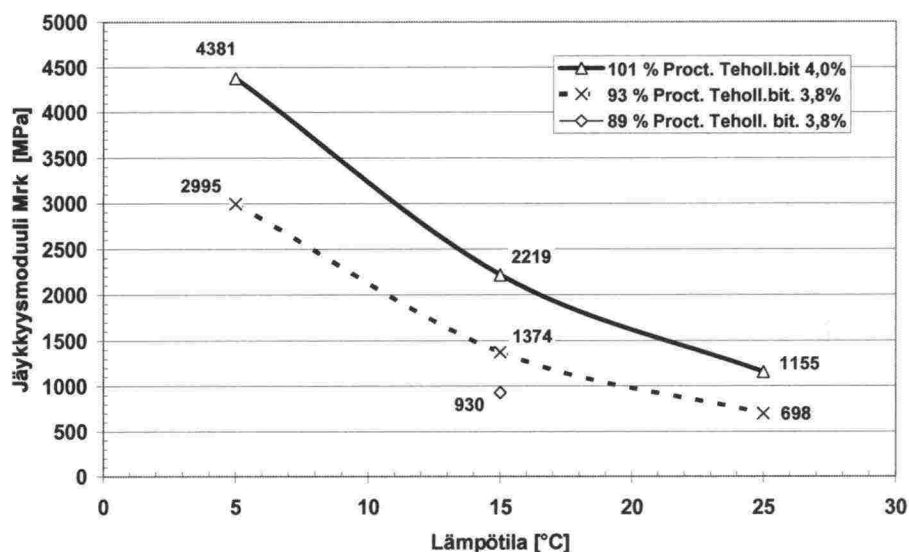


Kuva 27. REST-massan jäykkyyshmoduulin riippuvuus rakeisuudesta ja sideainepitoisuudesta (bit. B160/220,  $T = 15\text{ °C}$ ).



Kuva 28. REST-massan jäykkyyshmoduulin riippuvuus tehollisesta bitumipitoisuudesta ja tiiveydestä, (bit. B160/220,  $T = 15\text{ °C}$ ).

Lämpötilan vaikutus jäykkyyteen ja tiiveyteen tutkittiin rakeisuuden B eri tiiveyden omaavista näytteistä. Lämpötilalla ( $5\text{--}25\text{ °C}$ ) on voimakas vaikutus jäykkyyteen, kuva 29.



Kuva 29. REST-massan jäykkyyshmoduulin riippuvuus lämpötilasta (rakeisuus B).

### Deformaatiokestävyys (REST)

REST-massan deformaatiokestävyyden riippuvuus massan rakeisuudesta, bitumipitoisuudesta ja tiiveydestä tutkittiin dynaamisella creep-kokeella kohdan 2.3.7 mukaisesti lämpötilassa 40 °C.

Ensimmäisen valmistuserän REST-massojen deformoitumisen todennäköisiä syitä olivat näytteiden alhainen tiiveys ja suhteellisen korkea bitumipitoisuus.

Lisäkokeissa REST-näytteissä ei ollut tiiviyspuutteita, mutta niiden deformoitumista edisti työmaakäytäntöön verrattuna korkea bitumipitoisuus.

Kun REST-näytteiden bitumipitoisuus oli rakeisuudesta riippuen 0,7 – 1 %-yksikön alle kokemuseräisen kaavan ohjearvojen, ne täyttivät deformaatioluokan I mukaiset vaatimukset. Kokemuseräisen kaavan mukaisen tai sitä korkeamman bitumipitoisuuden käyttö tai liian alhainen tiivistystyömäärä johti deformaatioherkkiin massoihin.

Käytännössä työmailla nykyisin käytettävä REST-massan kokonaisbitumipitoisuuden tavoitetaso yleensä on noin 3,3 - 3,4 % ja toteuma noin 2,9 – 3,8 %. Asfalttinormien mukaiset bitumipitoisuuden ohjeelliset arvot ovat 3,2 – 4,2 % eli sallivat korkeampia pitoisuuksia (kun hienoainesta on 5 – 12 % eli rakeisuus on STABIL-tutkimuksen C ja A-rakeisuuskäyrien välisellä alueella). Kirjallisuudessa (Remix-stabilointi-raportti s. 42, [5]) todetaan, että (REST-massan) sideainepitoisuudella 3 – 4 % ja hienoainemäärällä > 7 % sekä hyvällä sekoituksella ja tiivistyksellä päästään 7 – 8 % tyhjätilaan.

Tutkimuksessa saatiin edellä olevan mukaan selville raja-arvot deformaatiota kestävästä REST-massan bitumipitoisuudelle. Nämä raja-arvot vastaavat nykyistä työmaakäytäntöä, mutta ovat alhaisempia kuin nykyisten ohjeiden suositukset.

### 3.2.3.3 KOST-stabilointimassan ominaisuudet

#### Yleistä

Komposiittistabilointimassan toiminnallisina ominaisuuksina tutkittiin vedenkestävyys, pakkasenkestävyys, suola-pakkaskestävyys, deformaatiokestävyys ja dynaaminen jäykkyysmoduuli.

Laajimmat tutkimukset tehtiin perusvaihtoehdoksi valitusta massakoostumuksesta K5-B, jonka rakeisuus oli vaihtoehdon B mukainen, bitumilaji B160/220 ja sementti SR-sementtiä. Muilla koostumuksilla ei tehty yhtä laajoja koesarjoja, vaan niiden ominaisuuksia verrattiin perusvaihtoehtoon vaihdellen kerrallaan yhtä muuttujaa (rakeisuus, bitumilaji, sideainepitoisuus, tiiveys jne.)

Tutkittujen koostumusten keskiarvotulokset on esitetty taulukossa 34 ja yksittäisten näytteiden tulokset liitteissä 17a-b, 20, 21, 23 ja 26.

#### Vedenkestävyys (KOST)

Vedenkestävyys tutkittiin märkinä ja kuivina koestettujen näytteiden halkaisuvetolujuuksien suhteen perusteella lämpötilassa 10 °C.

Rakeisuuden vaikutus vedenkestävyyteen tutkittiin vertaamalla toisiinsa kunkin rakeisuuden (A – C) suhteituskokeiden perusteella valitulla tavoitekoostumuksella valmistettuja komposiittistabilointimassoja (K1-A, K5-B ja K11-C).

- vedenkestävyydeltään paras oli vaihtoehto K5-B (rakeisuus B, tarttuvuusluku 72 %),
- lähes yhtä hyvä vedenkestävyydeltään oli eniten hienoainesta sisältävä koostumus K1-A (rakeisuus A, tarttuvuusluku 67 %) ja
- hieman heikompi vedenkestävyys oli vähiten hienoainesta sisältävällä koostumuksella K11-C (rakeisuus C, tarttuvuusluku 50 %), taul. 34.

Bitumilajin vaikutus vedenkestävyyteen tutkittiin vertaamalla keskenään KOST-massoja K5-B (bitumi B160/220), K10-B (pehmeämpi bitumi B650/900) ja K9-B (kovempi bitumi B70/100). Viimeksi mainittu koostumus sisälsi muista poiketen toimituserän 1 mukaista PAB-B-rouhetta 25 % ki-viaineksen ja rouheen yhteismassasta. Muut KOST-koostumukset eivät sisältäneet rouhetta.

Perusvaihtoehdon K5-B vedenkestävyys oli 72 % ja kovaa bitumia (sekä rouhetta) sisältäneen massan vedenkestävyys 70 % olivat käytännössä samaa tasoa. Pehmeää bitumia sisältäneen massan vedenkestävyys (64 %) jäi vähän heikommaksi, 32.

Bitumipitoisuuden vaikutus vedenkestävyyteen tutkittiin vertaamalla toisiinsa KOST-massoja K2-B, K5-B ja K8-B (bitumilaji B160/220).

Kun sementtipitoisuus pidettiin vakiona (1 %) ja bitumipitoisuutta nostettiin sarjassa 2,5 % → 3,0 % → 4,0 %, muuttui komposiittistabiloinnin vedenkestävyys vastaavasti sarjassa 60 % → 72 % → 76 % eli bitumin lisäys paransi vedenkestävyyttä, taul. 34.



Taulukko 34. KOST-stabilointimassan eri koostumusten K1-A...K11-C toiminnalliset ominaisuudet (keskiarvot).

Koostumusvaihtoehdot													
		Lämpö-tila	yläraja-käyrä	vähemm. bit.	enemmän sem.	löyhempi	perusratkaisu		enemmän sem.	enemmän bit.	rouhe	pehm. bit	alaraja-käyrä
		°C	K1-A	K2-B	K3-B	K4-B	K5-B	K6-B	K7-B	K8-B	K9-B	K10-B	K11-C
	%	10 (HVL)	67	60	74	53	72		82	76	70	64	50
Vedenkestävyys (HVL)	%	10 (HVJ)	55	57	82	54	74		78	77	66	55	50
Vedenkestävyys (HVJ)	kPa	10	887	759	1126	590	785		1328	1030	853	758	459
HVL, kuiva	kPa	10	590	452	828	313	567		1083	784	596	487	231
HVL, märkä	MPa	10	280	188	278	124	182		370	198	184	210	92
HVjäykkyys, kuiva	MPa	10	154	106	229	67	134		291	152	121	115	46
HVjäykkyys, märkä													
Pakkasenkestävyys (HVL)	%		83				75		80	63	87		47
Pakkasenkestävyys (HVJ)	%		77				60		80	52	97		19
HVL refer., märkä	kPa	10	708				772		1323	1149	749		261
HVL pakkasv., märkä	kPa	10	585				582		1056	728	655		123
HVjäykk. refer., märkä	MPa	10	164				189		349	220	120		65
HVjäykk. pakkasv., märkä	MPa	10	126				114		278	114	116		12,1
Suola-pakkasenkestävyys	%							77					
Deformaatiokest. (creep)	%	40	0,02				0,04			0,04		0,04	0,04
Dyn. jäykkyyso-moduuli M <sub>rk</sub>	MPa	5					6287			6639			
		15	6789	5756	8829	2754	5688		9185	5342	4264	7385	2074
		25					4717			3628			
KOOSTUMUS													
Rakeisuuskäyrä			A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	C
PAB-B-rouhepitoisuus	%		0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0
Bitumi vaahdotettuna			B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B160/220	B 70/100	B650/900	B160/220
Kokonaisbitumipitoisuus	%		3,2	2,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0	3,6*)	3,0	2,5
SR-sementtipitoisuus	%		1,1	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	0,9	1,0	0,8
Vesipitoisuus	%		4,3	3,8	3,3	3,2	3,2	3,2	3,4	2,2	2,1	3,2	4,0
Kuivairtoiheys (sis. bitumin ja kemiall. sitout. veden)	kg/m3		2191	2230	2258	2124	2242	2191	2273	2265	2229	2242	2103
tiiveys % Proctor-tiiveydestä	%		95	95	95	90	95	93	95	95	95	95	95
tiiveys % ICT 200r tiiveydestä	%							96					

\*) Koostumuksen K9-B bitumipitoisuus sisältää 1 %-yksikön rouheen tehollista bitumia

Sementtipitoisuuden vaikutus vedenkestävyyteen tutkittiin vertaamalla toisiinsa KOST-massoja K5-B, K3-B ja K7-B.

Kun tässä vertailussa bitumipitoisuus pidettiin vakiona (3 %) ja sementtipitoisuutta nostettiin sarjassa 1,0 % → 1,5 % → 2,0 %, muuttui komposiittistabiloinnin vedenkestävyys vastaavasti sarjassa 72 % → 74 % → 82 % eli sementin lisäys paransi lievästi vedenkestävyyttä, taul. 34.

Rouhepitoisuuden vaikutus vedenkestävyyteen tutkittiin massojen K5-B ja K9-B tulosten perusteella. Jälkimmäinen koostumus sisälsi rouhetta 25 % (kiviaineksen ja rouheen yhteismassasta). Muut KOST-massat eivät sisältäneet rouhetta lainkaan.

Perusvaihtoehdon K5-B bituminen sideaine oli B160/220, bitumipitoisuus 3 % ja sementtipitoisuus 1 %. Rouhetta sisältävän massan K9-B bitumilaji oli B70/100, lisäbitumipitoisuus 2,6 % (rouheen bitumi huomioon ottaen massan tehollinen bitumipitoisuus oli 3,6 %) ja sementtipitoisuus 0,9 %.

Perusvaihtoehdon vedenkestävyys oli 72 % ja rouhetta sisältäneen massan vedenkestävyys oli 70 % eli molemmat olivat vedenkestävyydeltään samaa tasoa, taul. 34.

Näytteen tiiveyden vaikutus vedenkestävyyteen tutkittiin vertaamalla toisiinsa KOST-massoja K4-B ja K5-B.

Perusvaihtoehdon K5-B näytteiden tiveys oli 95 % Proctor-tiiveydestä ja vedenkestävyys 72 %. Alhaisemmalla tiiveydellä (90 % Proctorista, massa K3-B), vedenkestävyys oli 53 %, mikä osoittaa tiiveyden vaikuttavan merkittävästi vedenkestävyyteen, taul. 34.

### **Pakkasenkestävyys (KOST)**

Pakkasenkestävyys tutkittiin syklisen jäädytys-sulatuskokeen avulla kohdan 2.3.9 mukaisesti. Jäädytys-sulatusrasituksen jälkeen näytteille ja niiden vertailunäytteille tehtiin kohdan 2.3.4 mukainen halkaisuvetolujuuskoe vesiupotuksen jälkeen 10 °C:ssa.

Rakeisuuden vaikutus pakkasenkestävyyteen tutkittiin vertaamalla toisiinsa kunkin rakeisuuden (A – C) suhteituskokeiden perusteella valitulla tavoitekoostumuksella valmistettuja komposiittistabilointimassoja (K1-A, K5-B ja K11-C).

- pakkasenkestävyydeltään paras oli eniten hienoainesta sisältävä vaihtoehto (rakeisuus A, pakkasenkestävyys 83 %),
- toiseksi paras oli K5-B (rakeisuus B, pakkasenkestävyys 75 %) ja
- merkittävästi heikompi pakkasenkestävyys oli vähiten hienoainesta sisältävällä koostumuksella K11-C (rakeisuus C, pakkasenkestävyys 47 %). Tämän massan halkaisuvetojäykkyys aleni myös merkittävästi pakkaskokeessa, taul. 34.

Bitumipitoisuuden vaikutus pakkasenkestävyyteen tutkittiin vertaamalla toisiinsa KOST-massoja K5-B ja K8-B (bitumilaji B160/220). Kun sementtipitoisuus pidettiin vakiona (1 %) ja bitumipitoisuutta nostettiin 3,0 % → 4,0 %, aleni komposiittistabiloinnin pakkasenkestävyys vastaavasti 75 %:sta 63 %:iin. Pakkaskestävyyden aleneminen bitumipitoisuuden noustessa saattaa johtua näytteiden hajonnan aiheuttamasta virheellisestä tuloksesta. Bi-



tumipitoisuuden lisäys nosti kuitenkin sekä jäädytys-sulatusrasitettujen että niiden vertailunäytteiden halkaisuvetolujuutta, taul. 35.

*Taulukko 35. Bitumipitoisuuden vaikutus KOST-massan halkaisuvetolujuuteen ja jäädytys-sulatusvanhennuksen kestävyYTEEN.*

Bit + sem [%]	3 + 1	4 + 1		
	Koostumus			
	K5-B	K8-B	Muutos	Muutos
	kPa	kPa	kPa	%
HVL ei vanh	772	1149	377	49
HVL vanhennettu	582	728	146	25
HVL:n muutos kPa	-190	-421		
HVL:n muutos %	-25	-37		
Pakkaskesto %	75	63		

Kun komposiitin bitumi-sementtisuhde oli 3:1, massalla oli parempi pakkaskestävyys kuin sideainesuhteen ollessa 4:1.

Sementtipitoisuuden vaikutus pakkaskestävyyteen tutkittiin vertaamalla toisiinsa KOST-massoja K5-B ja K7-B, joiden sementtipitoisuudet olivat 1,0 % ja 2 %. Bitumipitoisuus oli näissä vaihtoehdoissa 3 %.

Kun bitumipitoisuus pidettiin vakiona (3 %) ja sementtipitoisuutta nostettiin 1,0 % → 2,0 %, muuttui komposiittistabiloinnin pakkaskestävyys vastavasti 75 % → 80 % eli sementin lisäys paransi lievästi pakkaskestävyyttä, taul. 34.

Rouhepitoisuuden vaikutus pakkaskestävyyteen tutkittiin massojen K5-B ja K9-B tulosten perusteella. Viimeksi mainittu massa sisälsi toimituserän 1 mukaista PAB-B-rouhetta 25 % (kiviaineksen ja rouheen yhteismassasta). Muut KOST-massat eivät sisältäneet rouhetta lainkaan.

Perusvaihtoehdon K5-B pakkaskestävyys oli 75 % ja rouhetta sisältäneen massan pakkaskestävyys oli 87 %. Rouheen käyttö massan osa-aineena paransi siten pakkaskestävyyttä, vaikka rouhekomposiitin lisäbitumi oli kovempaa kuin perusvaihtoehdon bitumi, taul. 34.

#### **Suola-pakkaskestävyys (KOST)**

Suola-pakkaskestävyys tutkittiin kohdan 2.3.10 mukaisesti. Suola-pakkasrasituksen jälkeen KOST-näytteille ja niiden vertailunäytteille tehtiin kohdan 2.3.4 mukainen halkaisuvetolujuuskoe vesiupotuksen jälkeen 10 °C:ssa.

Suola-pakkaskestävyys tutkittiin vain perusvaihtoehdon mukaisella koostumuksella K6-B. Suola-pakkaskestävyysskoheen tulos oli 77 %. Suola-pakkasrasitus alensi siten halkaisuvetolujuutta 23 % ja tuloksen mukaan massa kesti suola-pakkaskokeen.

#### **Deformaatiokestävyys (KOST)**

KOST-massan deformaatiokestävyyden riippuvuus massan rakeisuudesta, bitumilajista ja bitumipitoisuudesta tutkittiin dynaamisella creep-kokeella kohdan 2.3.7 mukaisesti.



Rakeisuuden vaikutus deformaatiokestävyyteen tutkittiin vertaamalla toisiinsa kunkin rakeisuuden (A – C) komposiittistabilointimassoja. Kaikilla kolmella rakeisuusvaihtoehdolla oli erinomainen deformaatiokestävyys (deformaatio 0,04 % tai vähemmän).

Bitumilajin vaikutus deformaatiokestävyyteen tutkittiin vertaamalla toisiinsa KOST-massojen perusvaihtoehtoa K5-B (bit. B160/220) ja pehmeää bitumia sisältävää massaa K10-B (bit. B650/900).

Pehmeämmän bitumin B650/900 käyttö ei heikentänyt KOST-massan deformaatio-ominaisuuksia (deformaatio molemmilla massoilla 0,04 %).

Bitumipitoisuuden vaikutus deformaatiokestävyyteen tutkittiin vertaamalla toisiinsa KOST-massoja K5-B ja K8-B (bitumilaji B160/220). Sementtipitoisuus oli näissä vaihtoehdoissa 1 %.

Bitumipitoisuuden lisäys tutkituissa rajoissa (3 → 4 %) ei vaikuttanut KOST-massan deformaatio-ominaisuuksiin (deformaatio molemmilla massoilla 0,04 %), taul. 34.

#### **Jäykkyysmoduuli (KOST)**

KOST-massan jäykkyysmoduulin riippuvuus massan rakeisuudesta, bitumilajista, bitumi- ja sementtipitoisuudesta, rouheen käytöstä ja tiiveydestä tutkittiin dynaamisella, yksiaksiaaliseseen puristukseen perustuvalla menetelmällä kohdan 2.3.8 mukaisesti.

Rakeisuuden vaikutus jäykkyysmoduuliin tutkittiin 15 °C:ssa vertaamalla toisiinsa kunkin rakeisuuden (A – C) tavoitekoostumuksella valmistettuja komposiittistabilointimassoja. Korkein jäykkyysmoduuli oli eniten hienoainesta sisältäneellä KOST-massalla (K1-A) ja alhaisin moduuli oli vähiten hienoainesta sisältäneellä vaihtoehdolla (K11-C). Rakeisuudella A jäykkyysmoduuli oli yli kolminkertainen rakeisuuteen C verrattuna, kuva 30.

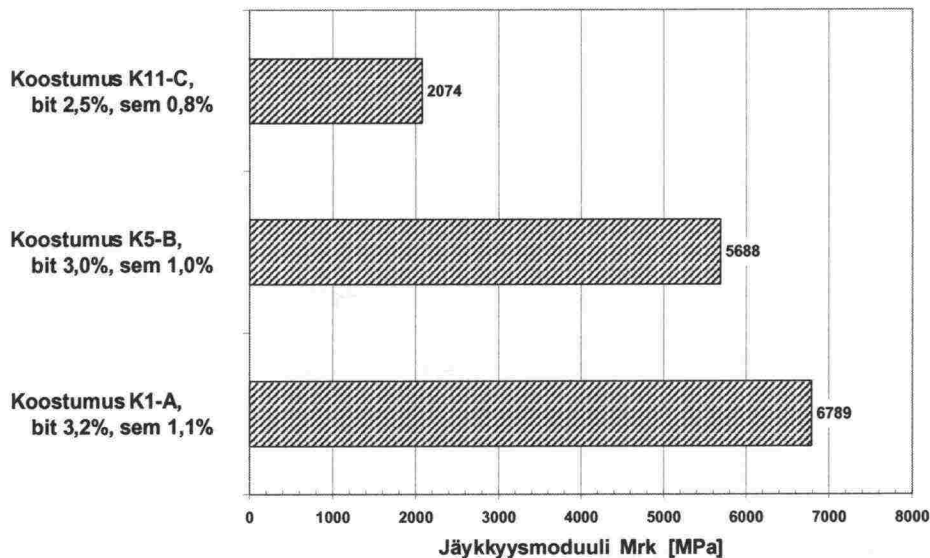
Enemmän hienoainesta sisältävät koostumukset sisälsivät enemmän sementtiä ja bitumia, mikä selittää tutkituilla sideainepitoisuuksilla osittain rakeisuudesta johtuvia jäykkyyseroja.

Bitumipitoisuuden vaikutus jäykkyysmoduuliin tutkittiin vertaamalla toisiinsa kolmea B-rakeisuuden omaavaa KOST-massaa (K2-B, K5-B ja K7-B). Kun sementtipitoisuus pidettiin vakiona (1 %) ja bitumipitoisuutta nostettiin sarjassa 2,5 % → 3,0 % → 4,0 %, muuttui komposiittistabiloinnin jäykkyysmoduuli 15 °C:ssa vastaavasti sarjassa 5760 → 5690 → 5340 MPa eli bitumin lisäys heikensi lievästi moduulia. Moduulin aleneminen johtui siitä, että bitumipitoisuuden kasvu muuttaa KOST-massan joustavammaksi, taul. 34 ja kuva 31.

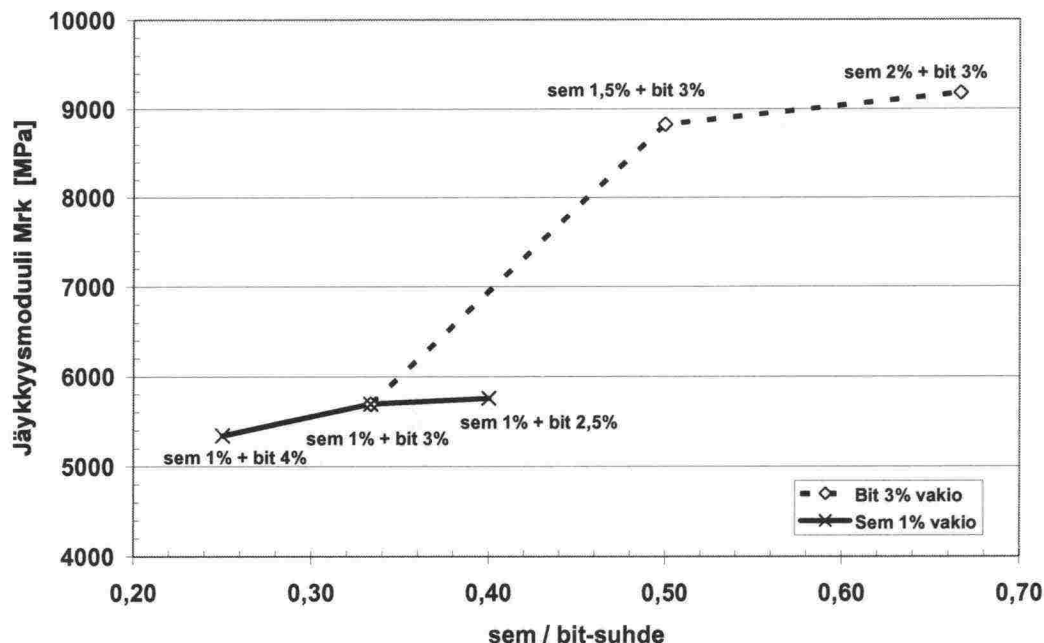
Sementtipitoisuuden vaikutus jäykkyysmoduuliin tutkittiin vertaamalla toisiinsa kolmea B-rakeisuuden omaavaa massaa K5-B, K3-B ja K7-B. Kun bitumipitoisuus pidettiin vakiona (3 %) ja sementtipitoisuutta nostettiin sarjassa 1,0 % → 1,5 % → 2,0 %, muuttui komposiittistabiloinnin vedenkestävyys vastaavasti sarjassa 5690 → 8830 → 9190 eli sementin lisäys paransi voimakkaasti moduulia. Moduulin kasvattaminen sementtiä lisäämällä tekee KOST-massan hauraammaksi, taul. 34.

Kuvassa 31 on esitetty rakeisuuden B omaavan KOST-massan jäykkyysmoduulin riippuvuus sementti / bitumi –suhteesta ja osa-aineiden pitoisuuksista. Kuvasta näkyy selkeästi massan moduulin herkkyyden sementtimäärän lisäykselle, kun sementtipitoisuus kasvoi 1,0 % → 1,5 %. Tutkimuksen kolmen rae-

raekoostumuksen (A – C) KOST-massojen tavoitekoostumusten sementti / bitumisuhteeksi oli valittu ennakkokokeissa on noin 0,33.



Kuva 30. KOST-massan jäykkyyshmoduulin riippuvuus rakeisuudesta ja tavoitesideainepitoisuudesta ( $T = 15\text{ °C}$ ).



Kuva 31. KOST-massan jäykkyyshmoduulin riippuvuus sementti / bitumi - suhteesta ja sideainepitoisuuksista,  $T = 15\text{ °C}$

Rouhepitoisuuden vaikutus jäykkyyshmoduuliin tutkittiin ilman rouhetta valmistetun massan K5-B ja 25 % rouhetta sisältäneen massan K9-B tulosten perusteella. Ensin mainitun bitumisen sideaine oli B160/220, bitumipitoisuus 3 % ja sementtipitoisuus 1 %. Rouhetta sisältävän massan bitumilaji oli

B70/100, lisäbitumipitoisuus 2,6 % (rouheen bitumi huomioon ottaen massan tehollinen bitumipitoisuus oli 3,6 %) ja sementtipitoisuus 0,9 %.

Ilman rouhetta valmistetun KOST-massan jäykkyyssmoduuli oli 5690 MPa ja rouhetta ja kovempaa bitumia sisältäneen massan vastaava arvo 4260 MPa, taul. 34.

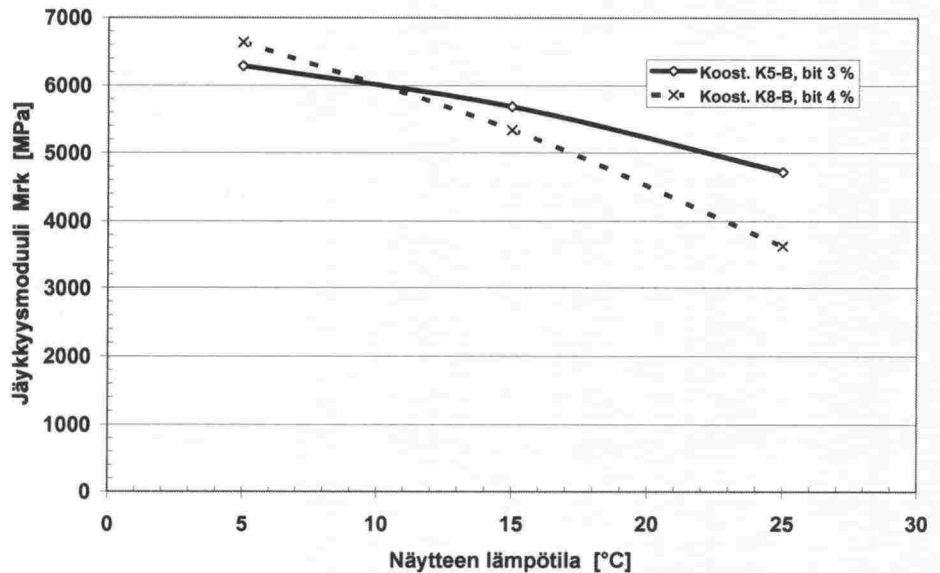
Näytteen tiiveyden vaikutus jäykkyyssmoduuliin tutkittiin vertaamalla toisiinsa KOST-massoja, joiden tiiveydet olivat 90 % ja 95 % (massat K4-B ja K5-B).

Kun näytteen tiiveys oli 95 % Proctor-tiiveydestä, jäykkyyssmoduuli oli 5690 MPa. Alhaisemmalla tiiveydellä (90 % Proctorista), moduuli oli noin 2750 MPa eli alle puolet edellisestä, taul. 34.

Koestuslämpötilan (5–25°C) vaikutus jäykkyyssmoduulin tutkittiin KOST-massojen kahdella eri bitumipitoisuudella (3 ja 4 %) kun sementtipitoisuus oli 1 %.

Kuvan 32 mukaan jäykkyyssmoduulin lämpötilaherkkyys kasvoi huomattavasti, kun bitumipitoisuutta lisättiin 3 % → 4 %. Samalla sementti- bitumisuhde muuttui 0,33 → 0,25.

Enemmän bitumia sisältävän komposiitin jäykkyys oli herkempi lämpötilan muutokselle, mikä kuvaa massan ominaisuuksien muuttumista enemmän asfaltinomaiseen suuntaan, kuva 32.



Kuva 32. KOST-massan jäykkyyssmoduulin riippuvuus lämpötilasta ja bitumipitoisuudesta (bitumi B160/220, sementtipitoisuus 1 %, ikä 28 d).



## 4 MENETELMIEN ARVIOINTI

### Suhteitus

Stabilointiohjeen [1] kokemusperäiset kaavat johtivat REST-massoilla liian korkeisiin lisäbitumipitoisuuksiin, mikä voi johtaa massan deformaatioherkyyden kasvuun. Stabilointien suhteitusohjeet ja ohjeelliset koostumukset tulee tarkistaa Stabilointiohjeen päivityksen yhteydessä.

### Näytevalmistus

Tutkimusnäytteet tulee tiivistää ennakolta valittuun tavoitetiiveyteen. Tiiviys vaikuttaa olennaisesti stabilointimassan laatuun.

Kiertotiivistin soveltui paremmin kuin Proctor-menetelmä erityisesti lämpimänä sekoitettavien REST-näytteiden tavoitetiiveyden määrittämiseen, koska tällöin tavoitetiiveysnäytteet valmistettiin samalla tavoin kuin esim. suhteituskoenäytteet ja suurin osa tutkimusnäytteistä. Kiertotiivistin soveltui myös muiden stabilointityyppien näytevalmistukseen.

Bitumilla sidotut stabilointinäytteet tulee varastoida näytteen valmistuksen jälkeen huoneilmassa ritilän päällä, koska ne eivät lujitu kunnolla kosteasäilytyksessä. Bitumistabilointinäytteiden lujittumista voidaan nopeuttaa lämpösäilytyksellä 40 °C:ssa ja saada tästä huolimatta tavanomaiseen varastointitapaan nähden vertailukelpoisia tuloksia.

Vaahdotumistabiloinnin bitumin sopiva vaahdotuslämpötila tutkituilla koostumuksilla oli 170 °C bitumilajista (B70/90, B160/220 tai B 650/900) riippumatta ja vaahdon vesipitoisuus 2,5 % bitumin määrästä.

### Tutkimusmenetelmät

Halkaisuvetolujuuteen perustuva vedenkestävyyskoe soveltui stabilointinäytteiden tartuketarpeen varmistamiseen, koska sen avulla pystyttiin tunnistamaan massat, joilla ei ollut riittävää vedenkestävyyttä ilman tartuketta.

Syklinen jäädytys-sulatuskoe soveltui hyvin stabilointimassan pakkasenkestävyyden mittaamiseen. Tulosten luotettavuuden kannalta on tärkeää, että ilman pakkasrasitusta säilytetyt vertailunäytteet saatetaan ennen halkaisua tai puristusta samaan kosteustilaan kuin pakkasrasitetut saman koostumuksen omaavat näytteet.

Stabilointimassojen (dynaamisen creep) deformaatiokokeen lämpötila oli PANK-menetelmän mukainen 40 °C, mikä on sama lämpötila kuin kulutuskerrosten testeissä. EN-standardin mukaan kantavan kerroksen asfaltin dynaaminen creep-koe tehdään 40 °C:ssa ja myös STABIL-projektin deformaatiokoeaineisto perustuu tähän lämpötilaan. Siksi deformaatiokokeen koestuslämpötilaa ei ole perusteita muuttaa.

## 5 SUOSITUKSET

Tutkimuksen tuloksena saatu uusi tieto stabilointien ominaisuuksista sekä niiden laatuun ja toimivuuteen vaikuttavista tekijöistä tulisi saattaa käyttöön viemälle se rakentamisen ohjeisiin ja toteutuskäytäntöön:

- Stabilointien rakentamisohjeet tulee päivittää ajan tasalle. Rakentamisohjeissa tulee yhtenäistää nykyinen sekalainen käytäntö massan osaineiden pitoisuuksien ilmoittamisessa. Kaikki pitoisuudet tulee ilmoittaa prosentteina stabiloinnin kuivasta (vedettömästä) massasta. Asfalttinormeissa esitetyt stabilointimassojen rakeisuuden ohjealueet ja ohjeelliset bitumipitoisuudet tulee tarkistaa. Rakeisuuden ohjealueen alarajaa tulisi nostaa.
- Stabilointien näytevalmistus- ja tutkimusohjeet tulisi tarkistaa. Kiertotiivistintä on suositeltavaa käyttää stabilointimassojen näytevalmistuksen tavoitetiiveyden valintamenetelmäksi (erityisesti bitumia sisältävät massat).
- Kokeellisten suhteitusmenetelmien suhteituskriteerit ja REST-massojen kokemuseräinen lisäbitumipitoisuuden valintamenetelmä tulee tarkistaa.
- Vaahtobitumistabiloinnissa tulee käyttää tartuketta, ellei kokeellisesti osoiteta, ettei tartuketta tarvita. Stabilointimassan bitumipitoisuus vaikuttaa selkeästi ominaisuuksiin, joten se tulee hallita joko ennakkokokeiden perusteella tai työmaan laadunohjauksen avulla.
- Vaahtobitumistabiloinnin bitumin vaahdotuslämpötilaa tulee nostaa olennaisesti. Sopiva tavoitearvo vaahdon leviämisen kannalta on 170 °C.
- Komposiittistabiloinnissa sopiva suhteituksen alustava lähtökohta on sementtilisäys noin 1 % ja sementti / bitumisuhte on noin 0,33.
- Stabiloinnin tiivistämiseen työmaalla ja laboratoriossa tulee kiinnittää erityistä huomiota.
- Tiivistystyön laadun ohjaamiseen ja dokumentointiin tulee työmaalla kiinnittää erityistä huomiota. Tiivistystyön laadun ohjaamisessa tulee mahdollisuuksien mukaan siirtyä jyräkohtaisten tiiveydentarkkailulaitteiden käyttöön. Pistekohtaista tiiveydenmittausmenetelmää käytettäessä tulee menetelmien luotettavuuteen kiinnittää erityistä huomiota (esim. Troxler suoramittausta pintamittausten asemasta).
- Stabilointimenetelmien tutkimista koetierakentamisen avulla tulisi edistää, koska pilottitutkimusten avulla voidaan parhaiten todentaa laboratoriossa saadut koetulokset.

## 6 YHTEENVETO

### 6.1 Yleistä

Tutkimuksen tavoitteena oli luoda pohja stabilointien käyttöön kokeellisten arviointimenetelmien kehittämiseksi ja parantaa stabilointialan osaamista sekä stabilointeihin kohdistuvaa tutkimustietämystä. Tavoitteen saavuttamiseksi pyrittiin toteuttamaan valittujen stabilointityyppien (VBST, REST ja KOST) osalta seuraavat tehtävät:

- selvitetään stabilointien ominaisuudet ja niihin vaikuttavat tekijät joko aiempien tutkimusten perusteella tai laboratoriokokeiden avulla pääosin nykyisiä menetelmiä käyttäen
- selvitetään stabilointimassoille soveltuvat näytteenvalmistus-, suhteitus- ja tutkimusmenetelmät sekä tarvittaessa kehitetään niitä,
- luodaan perusta stabilointien käyttöön arviointimenetelmien kehittämiseksi,
- täydennetään stabilointien nykytilaselvitystä [8] Ruotsin ja Norjan kokeusten perusteella.

Tutkimuksen laboratoriotutkimustulosten ja tiellä tehtävien stabilointien välillä on eroja massan valmistuksessa, tiiveydessä, kiviaineksissa ym. ja tästä syystä tutkimuksen laboratoriokoetuloksia ei voida suoraan soveltaa tiellä otettujen näytteiden arvosteluun.

### 6.2 Stabilointien käyttöön arviointimenetelmien kehittäminen

Stabilointien käyttöön laboratorio- ja kenttäkokeisiin perustuvan arviointimenetelmän kehittäminen oli osa tutkimuksen keskeistä sisältöä, johon liittyi käyttöön arvioinnin referenssimateriaalien kehittäminen (esim. mineraaleista kootun referenssitäytejauheen kehitys) ja referenssistabilointimassojen tutkimusmenetelmien kehitys sekä tutkittujen stabilointityyppien toiminnallisten ominaisuuksien ja niiden koostumusparametrien herkkyyksien selvitys nykyisin menetelmin.

Stabilointien käyttöön arviointimenetelmien kehittäminen sisältyy pääosin STABIL-projektin kolmanteen vaiheeseen [9].

### 6.3 Nykytilaselvityksen täydentäminen

Proctor-menetelmän asemasta otettiin käyttöön norjalainen tavoitetiiveyden valintamenetelmä, jossa stabiloinnin tavoitetiveys valitaan ICT-laitteen avulla. Menetelmä toimi hyvin erityisesti lämpimillä rouhepitoisilla massoilla ja antoi työmaahavaintoihin nähden vertailukelpoisia tiivistystuloksia sekä poisti erot tiivistyskokeiden ja toiminnallisten ominaisuuksien näytteiden valmistuksen väliltä. Tutkimuksessa kehitettiin menetelmää sekä tavoitetiiveyden että optimikosteuden määrittämiseksi ICT:n avulla.

Stabilointinäytteiden ennakkokokeiden nopeuttamiseksi selvitettiin, voidaan kokeiden kestoaikaa lyhentää muuttamalla näytteiden säilytystapaa ennen koestusta. Tutkimuksessa todettiin, että vaahtobitumistabilointinäytteiden lujuudenkehitystä voidaan nopeuttaa lämpösäilytyksellä 7d 40°C:ssa tavanomaisen säilytystavan asemasta (28 d 20-23 °C:ssa) ja että tämä Ruotsissa ja Norjassa käytössä olevan menettely tuotti samaa suuruusluokkaa olevan lujuustason kuin tavanomainen säilytystapa.



## 6.4 Suhteitus, näytevalmistus ja tutkimusmenetelmät

### Suhteitus

Nykyisen Stabilointiohjeen suhteitusmenetelmiä tulisi yhtenäistää ja niiden määrää tulisi vähentää. On kuitenkin tarpeen säilyttää mahdollisuus sekä kokemusperäisen että kokeellisen suhteitusmenetelmän käyttöön stabilointimassojen ennakkokokeissa. Paikallasekoitusmenetelmän asettamat rajoitukset ennakkosuhteitusmahdollisuuksille tulee ottaa huomioon ja varata riittävästi aikaa ennakkoselvityksiin.

Kokeellisten suhteitusmenetelmien suhteituskriteerit tulee tarkistaa. Remix-stabilointien ohjeellinen lisäbitumipitoisuus tulisi valita alhaisemmaksi kuin Stabilointiohjeen kokemusperäisten kaavojen mukainen ohjeellinen arvo. Kun stabilointityötä varten tehdään ennakkokokeita, tulisi selvittää massan tavoitetiiveys, optimivesipitoisuus tiivistämisen kannalta, vedenkestävyys ja sideainepitoisuus. Rakeisuuden tulee olla ohjealueella. Tämän tutkimuksen karkein rakeisuusvaihtoehto C tuotti huonosti tiivistyviä, hauraita massoja. Tämä rakeisuus vastaa Asfalttinormien stabilointimassojen ohjealueen alarajaa ja se tulee tarkistaa.

Bitumin vaahdottamisen laboratorio-olosuhteissa todettiin onnistuvan sekä vaahdotuslaitteella että avoimessa vaahdotusastiassa. Ennakkokokeissa todettiin soveltuviksi vaahdotusparametreiksi bitumin lämpötila 170 °C ja vaahdon vesipitoisuus 2,5 %.

VBST-massassa tulee käyttää tartuketta, ellei kokeellisesti osoiteta, että tartuketta ei tarvita. Tartuketarve voidaan osoittaa halkaisuvetolujuuteen perustuvan vedenkestävyyskokeen avulla. Tartuketta voidaan tarvita riippumatta siitä, sisältääkö massa rouhetta vai tehdäänkö se kylmänä tai lämmitettynä. KOST- ja Remix-stabiloinneissa ei tarvittu tutkituilla koostumuksilla erikseen lisättävää tartuketta, koska KOST:n sementti vähentää tartuketarvetta ja REST:n emulgaattori toimii myös tartuntaa parantavasti.

Bitumistabilointinäytteet tulee säilyttää kuivissa olosuhteissa ja komposiittistabilointinäytteet kosteassa ilmassa koestuksen aloitukseen asti.

### Stabilointimassojen näytevalmistus ja tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen alkuvaiheessa käytettiin Proctor-laitetta tavoitetiiveyden valintaan. Proctorin avulla määritetty kuivairtotiheystavoite jäi osalla massoja alhaisemmaksi ICT:n avulla määritetty vastaava tiiveyden ohjearvo. REST-massan tiivistysongelmien vuoksi tavoitetiiveys valittiin myöhemmissä kokeissa ICT-menetelmän avulla. ICT-laitte oli käyttökelpoinen näytteenvalmistuslaitte, kun selvitettiin stabilointimassan tiivistettävyyttä, tavoitetiiveys ja optimikosteus sekä valmistettiin stabilointimassanäytteitä (näytteiden korkeus oli noin 150 mm ja ne eivät yleensä kestä sahaamista).

## 6.5 Stabilointien ominaisuudet

Teknisesti paras stabilointitulos saavutetaan, kun

- käytetään suhteistunutta kiviainesta Asfalttinormien 2000 ohjerakeisuuden keskialueelta,
- bitumipitoisuus valitaan siten, että massa on koossapysyvää, mutta ei deformaatioherkkää,

- käytetään tarvittaessa massassa sideaineena bitumin lisäksi sementtiä, mikä yleensä lisää bitumistabiloinnin alkulujittumisnopeutta ja parantaa veden- sekä deformaationkestävyyttä,
- kerros tiivistetään hyvin optimikosteudessa.

Stabilointien ominaisuuksiin vaikuttavista tekijöistä ovat keskeisiä massan sideainepitoisuus, rakeisuus ja tiiveys. Tutkimuksen tuloksissa esitetään useista selvityksistä koostuva aineisto näiden parametrien vaikutuksesta massan toiminnallisiin ominaisuuksiin. Erityisesti tulee kiinnittää huomiota stabiloinnin tiivistämiseen sekä laboratoriokokeissa että työmaaolosuhteissa.

#### Vaahto-bitumistabilointi

Suhteituksessa valitun tavoitekoostumuksen mukaisella, tartuketta sisältävällä vaahto-bitumistabiloinnilla oli hyvä vedenkestävyys. Sideainepitoisuuden tai tiiveyden aleneminen alle tavoitearvon heikensi vedenkestävyyttä. Jos tartuketta ei käytetty, VBST-massa ei ollut vedenkestävää.

Massan pakkasenkestävyys tavoitekoostumuksella ja tiiveydellä (B-rakeisuus, 95 % Proctor-tiiveydestä) alitti lievästi muille rakenteille noudatettavan ohjearvon. Kun tiiveys oli 98-100% Proctorista (A- tai C-rakeisuus) pakkasenkestävyys täytti ohjearvot.

Massan deformaatiokestävyys tavoitekoostumuksella oli hyvä (I lk). Massa ei kestänyt deformaatiokokeessa, kun bitumipitoisuus kasvoi 1 %-yksikön yli suhteituksessa valitun tavoitetason tai kun käytettiin pehmeämpää bitumia (B650/900). VBST-massan jäykkyysmoduulikokeen tulokset olivat huomattavan herkkiä lämpötilan muutokselle.

#### Remix-stabilointi

REST-massan vedenkestävyys tutkituilla koostumuksilla oli hyvä. Massa oli helposti tiivistyvää. Tiiveyden aleneminen heikensi erityisesti eniten hienoainesta sisältäneen massan vedenkestävyyttä. Massan pakkasenkestävyys ja suola-pakkaskestävyys tutkittiin suhteituksessa valitulla tavoitekoostumuksella ja ne todettiin riittäviksi. Lämpötila ja tiiveys vaikuttivat huomattavasti REST-massan jäykkyysmoduulin tasoon.

REST-massan deformaatiokestävyys oli hyvä käytännön työmaaolosuhteissa käytetyillä bitumipitoisuuksilla. A ja B rakeisuuksilla hyvä deformaatiokestävyys saavutettiin tehollisella bitumipitoisuudella 3,3 % (kokonaisbitumipitoisuus 3,4 %) ja C-rakeisuudella tehollisella bitumipitoisuudella 2,5 % (kokonaisbitumipitoisuus 2,6 %).

Stabilointiohjeen kokemusperäisen kaavan mukainen bitumipitoisuus oli noin yhden prosenttiyksikön korkeampi ja johti deformaatioherkkiin massoihin. Näytteiden deformaatioherkkyys johtui liian alhaisesta tiiveydestä, liian korkeasta bitumipitoisuudesta tai molemmista.

#### Komposiittistabilointi

Komposiittistabiloinnin hyväksi alustavaksi suhteituksen lähtökohdaksi todettiin sementti/ bitumisuhde noin 0,33 ja sementtipitoisuus noin 1 %. Sementti sitoo massan ylimääräistä vettä ja massan nopeuttaa alkulujuuden kehitystä. Komposiittistabiloinnilla oli erityisen hyvä deformaatiokestävyys ja vähäinen lämpötilaherkkyys.

Komposiittistabilointi täytti vedenkestävyys-, pakkaskestävyys- ja suolapak-  
kaskestävyysvaatimukset ja oli deformaatiokestävyydeltään I-luokkaa.

## **6.6 Stabilointimenetelmän valinta**

Stabilointimenetelmä tulee valita ja suhteittaa käyttökohteen toiminnallisten  
vaatimusten mukaan:

- KOST ja VBST kestävät hyvin deformaatiota
- KOST- ja REST-massoilla on hyvä vedenkestävyys
- VBST ja REST kestävät alustan liikkeistä aiheutuvia vetojännityksiä.

Ratkaisevaa stabiloinnin laadun kannalta on hyvän tiiveyden saavuttaminen.  
Laaturiskejä voidaan vähentää varaamalla ennakkoselvityksiin riittävästi ai-  
kaa.



## 7 KIRJALLISUUSVIITTEET

- [1] Stabilointiohje (koekäytössä), Helsinki 2002. TIEH 2100009-02.
- [2] Jenkins, K., Molina, A., de Grout, J., van de Venn, M., Developments in the uses of foamed bitumen in road pavements. HERON, Vol. 45, No. 3 (2000)
- [3] Laaksonen, R., Hydraulisesti sidotun komposiitin jäykkyyssmoduulien menetelmäselvitys. Espoo 2002, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Sisäinen raportti RTE 40-IR-29/2002, 11 s.+ liitt. 4 s.
- [4] Mroueh, U.-M., Vahanne, P., Eskola, P., Pasanen, A., Wahlström, M., Mäkelä, E., Laaksonen, R., Pilaantuneiden maiden kunnostushankkeiden hallinta. Espoo 2004, VTT Tiedotteita 2245, 317 s. + liitt. 46 s.
- [5] Luiro, K., Remixer-stabilointi. Helsinki 1995, Tielaitoksen selvityksiä 1995.
- [6] Mixdesign. Oslo 1997, Statens Vegvesen/ Vegdirektoratet, Telemark prosjekt, Laboratorieserien, Rapport nr. 87, 112 s.+ liitt. 29 s.
- [7] Kalde bitumenstabiliserte bærelag. Oslo 1997, Statens vegvesen, Håndbok 198.
- [8] Pienimäki, M., Laukkanen, K., Bitumia sisältävien kerrosstabilointien pohjoismaiset testausmenetelmät. Helsinki 2007. Tiehallinnon selvityksiä 43/2007.
- [9] Laukkanen, K., Laaksonen, R., Stabilointien käyttöiän arvioinnin ja tuotehyväksynnän kehittäminen. Helsinki 2007. Tiehallinnon selvityksiä 46/2007.
- [10] Laaksonen, R., Laukkanen, K., Kerrosstabilointien täysmittakaavako-  
keet. Helsinki 2007. Tiehallinnon selvityksiä 45/2007.

## 8 LIITTEET

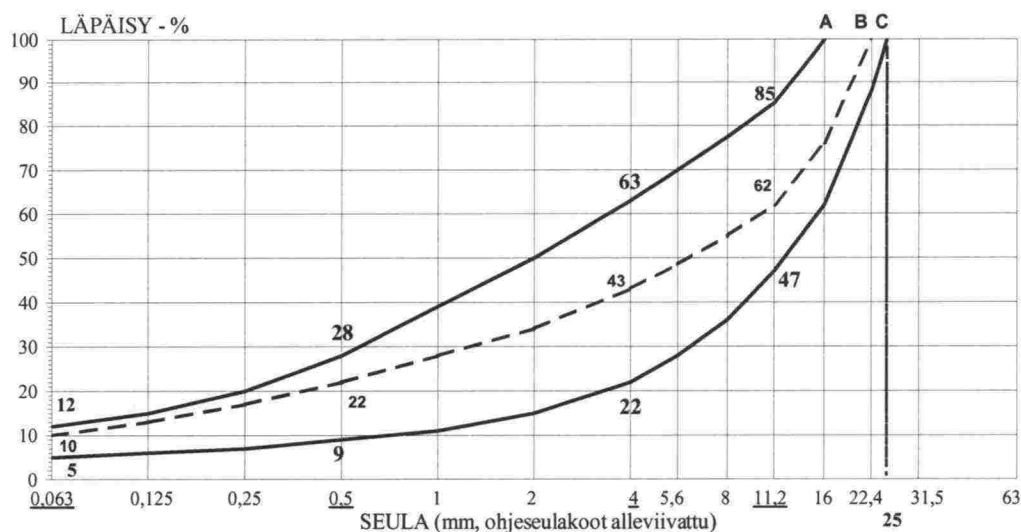
Kiviaineksen rakeisuustavoite	Liite 1
Referenssistabilointimassojen rakeisuus A ("Teiskon" hienoaines)	Liite 2
Referenssistabilointimassojen rakeisuus B ("Teiskon" hienoaines)	Liite 3
Referenssistabilointimassojen rakeisuus C	Liite 4
PAB-rouheen kiviaineksen rakeisuus (toimituserä 1)	Liite 5
PAB-rouheen rakeisuus (toimituserä 1)	Liite 6
PAB-rouheen kiviaineksen rakeisuus (toimituserä 2)	Liite 7
AB-rouheen rakeisuus	Liite 8
REST-massan rakeisuus A (rouhe-erä 1)	Liite 9
REST-massan rakeisuus B (rouhe-erä 1)	Liite 10
REST-massan rakeisuus C (rouhe-erä 1)	Liite 11
REST-massan rakeisuus A, (rouhe-erä 2), lisäko	Liite 12
REST-massan rakeisuus B, (rouhe-erä 2), lisäko	Liite 13
Remix -stabiloinnissa käytetyn emulsion pisarakokajakautuma	Liite 14
VBST-massan vedenkestävyys, näytekohtaiset tulokset	Liite 15a
VBST-massan vedenkestävyys, näytekohtaiset tulokset (jatkoa)	Liite 15b
VBST-massan vedenkestävyys, näytekohtaiset tulokset (jatkoa)	Liite 15 c
REST-massan vedenkestävyys, näytekohtaiset tulokset	Liite 16a
REST-massan vedenkestävyys, näytekohtaiset tulokset	Liite 16b
KOST-massan vedenkestävyys, näytekohtaiset tulokset	Liite 17a
KOST-massan vedenkestävyys, näytekohtaiset tulokset	Liite 17b
VBST-massan pakkasenkestävyys, näytekohtaiset tulokset	Liite 18
REST-massan pakkasenkestävyys, näytekohtaiset tulokset	Liite 19
KOST-massan pakkasenkestävyys, näytekohtaiset tulokset	Liite 20
VBST-, REST- ja KOST-massojen suola-pakkasenkestävyys, näytekohtaiset tulokset	Liite 21
VBST-massan deformaatiokestävyys, näytekohtaiset tulokset	Liite 22
REST-massan deformaatiokestävyys, näytekohtaiset tulokset	Liite 23
KOST-massan deformaatiokestävyys, näytekohtaiset	Liite 24
VBST-massan jäykkyysmoduuli, näytekohtaiset	Liite 25a
VBST-massan jäykkyysmoduuli, näytekohtaiset	Liite 25b
REST-massan jäykkyysmoduuli, näytekohtaiset	Liite 26
KOST-massan jäykkyysmoduuli, näytekohtaiset	Liite 27

## Kiviaineksen rakeisuustavoite

Stabilointien kehittämistutkimuksen laboratoriokokeissa käytettävän referenssimassan kiviaineksen rakeisuuden ohjekäyrät on esitetty kuvassa 34, joka on muokattu Asfalttinormien 2000 lisälehden 2003 rakeisuuskuvien 29 ja 30 perusteella. Se poikkeaa lisälehden kuvista mm. siten, että ohjealueen ylin rajakäyrä (A) on katkaistu 16 mm, keskimmäinen käyrä (B) 22,4 mm ja alin rajakäyrä (C) 25 mm seulalla laboratorionäytevalmistusteknistä syistä.

Laboratoriokokeissa referenssistabilointimassojen rakeisuuden tulee olla kuvan ohjealueella ja niiden tavoiterakeisuudet valitaan kuvan ohjekäyrien perusteella:

- A ja B mukaan, jos tuotteen käyttötarkoitus on osittain vanhan kerroksen stabilointi
- B ja C mukaan, jos tuotteen käyttötarkoitus on uuden kerroksen stabilointi
- A, B ja C mukaan, jos tuotteen on tarkoitus soveltua sekä uuden että vanhan kerroksen stabilointiin.



Kuva 32. Referenssistabilointimassojen ohjekäyrät A - C (vaahtobitumi-, komposiitti- ja Remix-stabilointi).



## Liite 2

### Referenssistabilointimassojen rakeisuus A ("Teiskon" hienoaines)

Massa: STABIL, ohjekäyrä A

Sideaine:

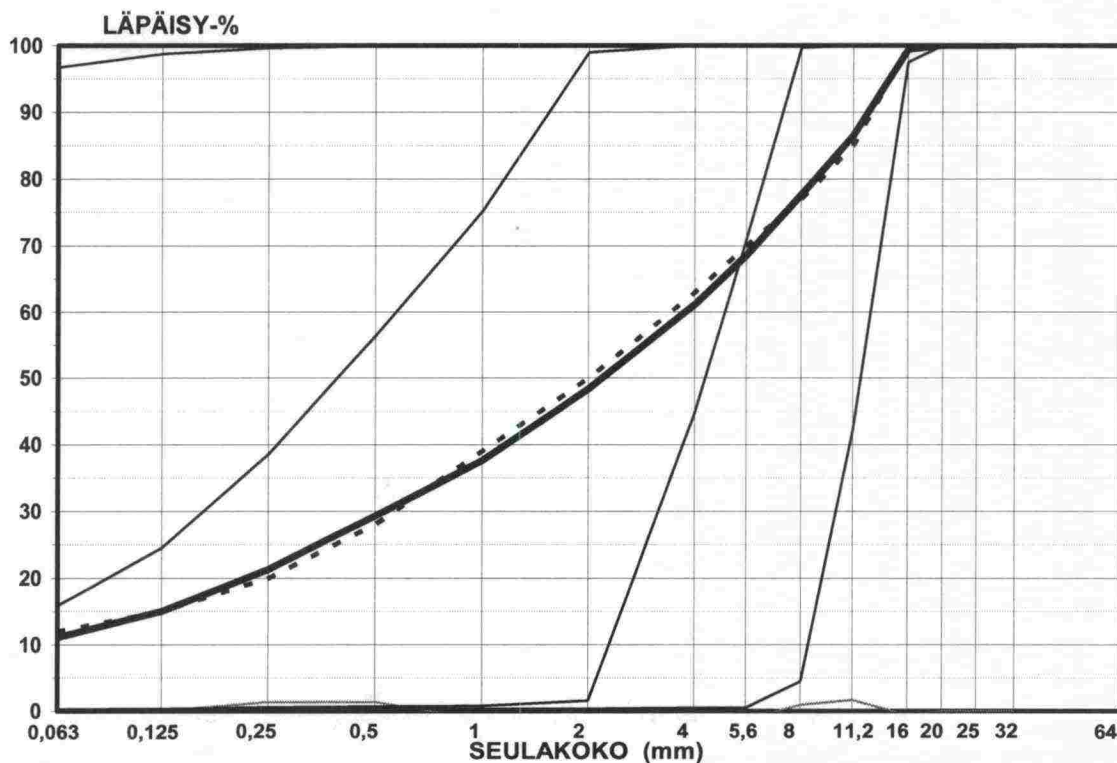
Täytejauhe: Seos 1: " Teisko "

Lisäaineet:

Kiviaines: KaM Teisko 2004

Muuta:

Massan tiheys:



Tiheydet: 2710				2653	2728	2718	2674		
Seososuudet: 100,0 %				4,0 %	44,5 %	28,5 %	23,0 %		
Seula	Erotus	Ohje	Seos	Seos 1	T 0/2	T 2/8	T 8/16		
0,063	-0,9	12	11,1	96,7	15,9	0,3	0,2		
0,125	0,0	15	15,0	98,7	24,5	0,4	0,3		
0,25	1,4	20	21,4	99,6	38,6	0,6	0,3		
0,5	1,4	28	29,4	99,9	56,4	0,7	0,4		
1	-1,2	39	37,8	100	75,2	0,8	0,4		
2	-1,4	50	48,6	100	99,0	1,6	0,4		
4	-1,6	63	61,4	100	100	44,8	0,5		
5,6	-1,2	70	68,8	100	100	70,9	0,5		
8	0,9	77	77,9	100	100	99,7	4,5		
11,2	1,7	85	86,7	100	100	100	42,2		
16	-0,6	100	99,4	100	100	100	97,5		
20	0,0	100	100,0	100	100	100	100		
25	0,0	100	100,0	100	100	100	100		
32	0,0	100	100,0	100	100	100	100		

## Referenssistabilointimassojen rakeisuus B ("Teiskon" hienoaaines)

Massa: STABIL, ohjekäyrä B

Sideaine:

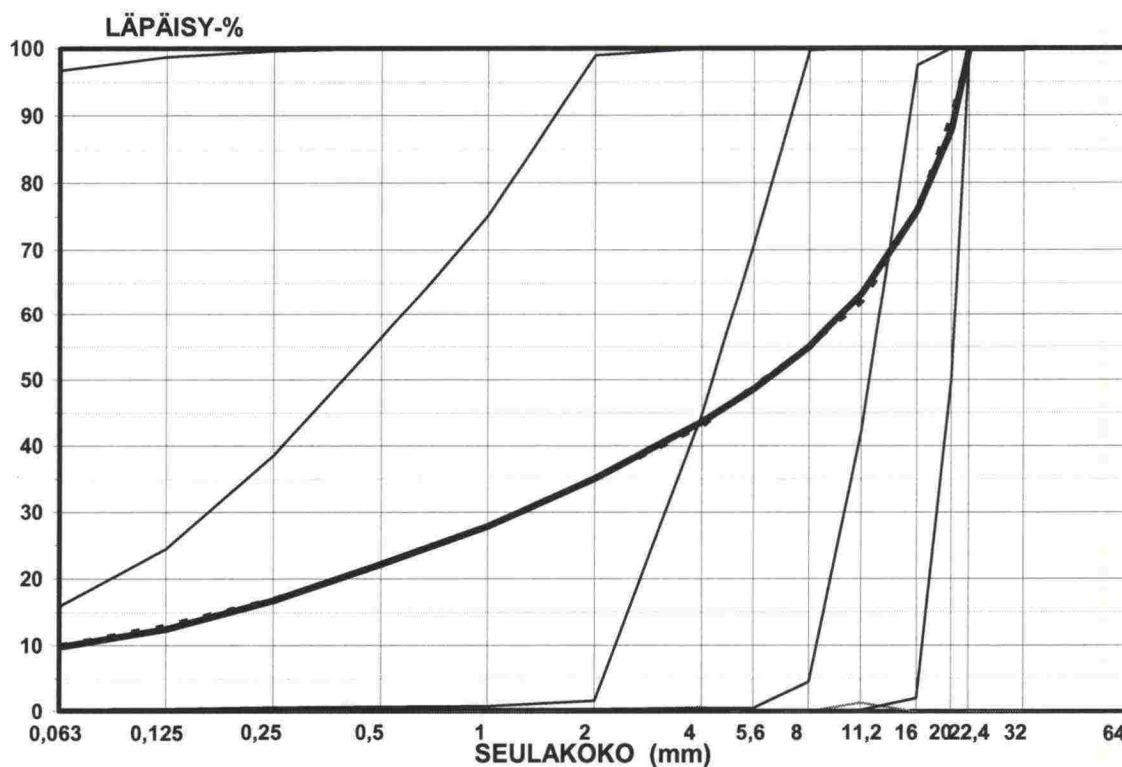
Täytejauhe: Seos 1: " Teisko "

Lisäaineet:

Kiviaines: KaM Teisko 2004

Muuta:

Massan tiheys:



Tiheydet: 2698				2653	2728	2718	2674	2677		
Seososuudet: 100,0 %				5,0 %	30,0 %	19,0 %	22,0 %	24,0 %		
Seula	Erotus	Ohje	Seos	Seos 1	T 0/2	T 2/8	T 8/16	T 16/22.4		
0,063	-0,2	10	9,8	96,7	15,9	0,3	0,2	0,2		
0,125	-0,5	13	12,5	98,7	24,5	0,4	0,3	0,2		
0,25	-0,2	17	16,8	99,6	38,6	0,6	0,3	0,2		
0,5	0,2	22	22,2	99,9	56,4	0,7	0,4	0,2		
1	-0,2	28	27,8	100	75,2	0,8	0,4	0,2		
2	0,1	35	35,1	100	99,0	1,6	0,4	0,2		
4	0,7	43	43,7	100	100	44,8	0,5	0,2		
5,6	-0,4	49	48,6	100	100	70,9	0,5	0,2		
8	0,0	55	55,0	100	100	99,7	4,5	0,2		
11,2	1,3	62	63,3	100	100	100	42,2	0,2		
16	-0,1	76	75,9	100	100	100	97,5	2		
20	-2,0	90	88,0	100	100	100	100	50		
22,4	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100		
32	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100		

## Referenssistabilointimassojen rakeisuus C

Massa: STABIL, ohjekäyrä C

Sideaine:

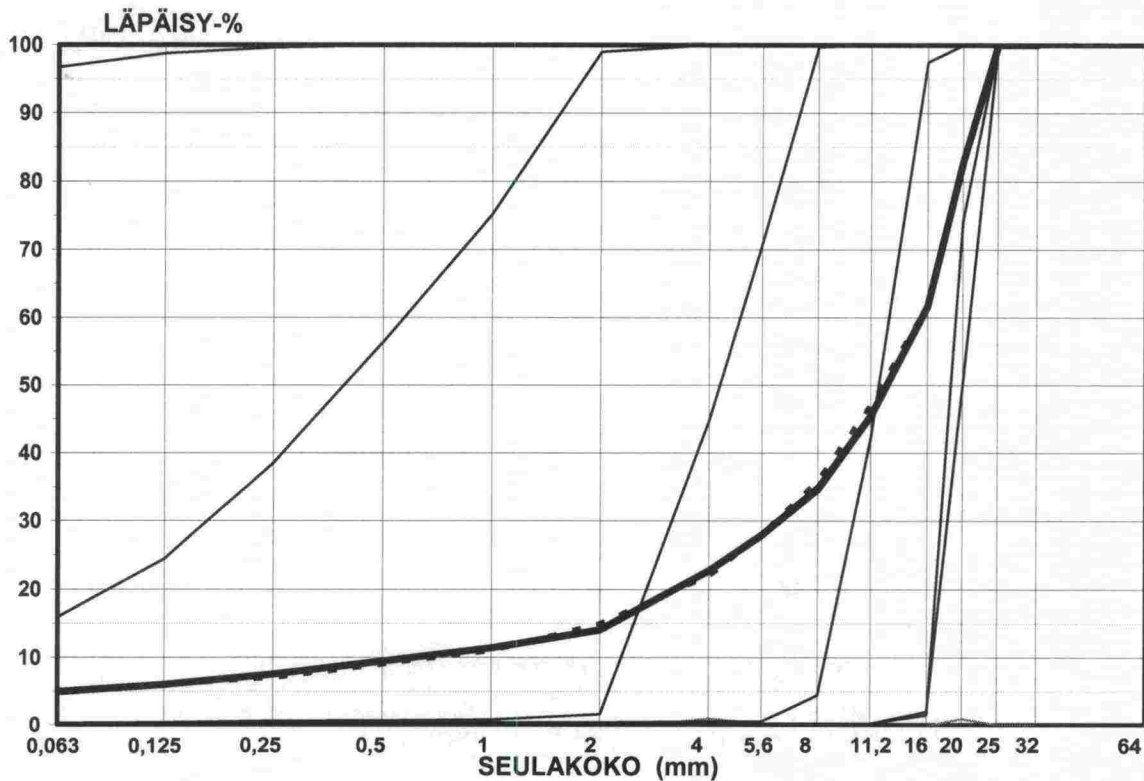
Täytejauhe: Seos 1: " Teiskon tyyppinen mineraalihienoinen "

Lisäaineet:

Kiviaines: KaM Teisko 2004

Muuta:

Massan tiheys:



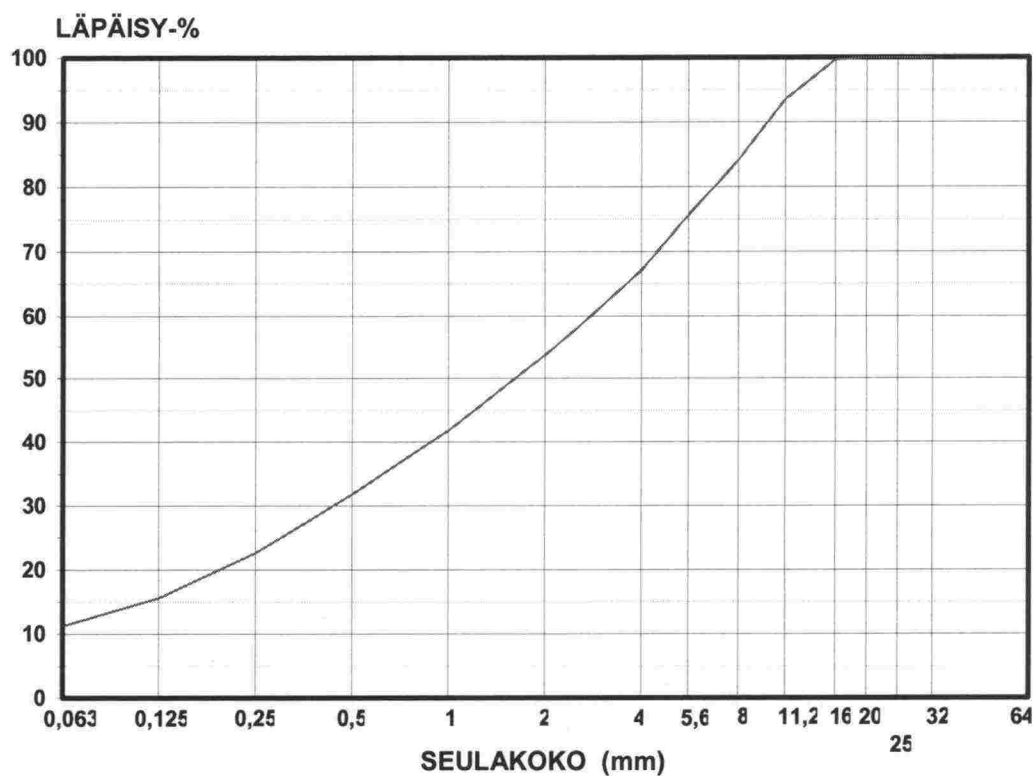
Tiheydet: 2689      2653      2728      2718      2674      2677      2677  
 Seososuudet: 100,0 %    3,2 %    10,6 %    20,0 %    28,0 %    30,0 %    8,2 %

Seula	Erotus	Ohje	Seos	Seos 1	T 0/2	T 2/8	T 8/16	T 16/22.4	T 16/25
0,063	0,0	5	5,0	96,7	15,9	0,3	0,2	0,2	0,1
0,125	0,0	6	6,0	98,7	24,5	0,4	0,3	0,2	0,1
0,25	0,6	7	7,6	99,6	38,6	0,6	0,3	0,2	0,1
0,5	0,5	9	9,5	99,9	56,4	0,7	0,4	0,2	0,1
1	0,5	11	11,5	100	75,2	0,8	0,4	0,2	0,1
2	-0,8	15	14,2	100	99,0	1,6	0,4	0,2	0,1
4	1,0	22	23,0	100	100	44,8	0,5	0,2	0,1
5,6	0,2	28	28,2	100	100	70,9	0,5	0,2	0,1
8	-0,9	36	35,1	100	100	99,7	4,5	0,2	0,2
11,2	-1,3	47	45,7	100	100	100	42,2	0,2	0,2
16	-0,2	62	61,8	100	100	100	97,5	2	1,5
20	0,9	82	82,9	100	100	100	100	50	74,2
25	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100	100
32	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100	100



## PAB-rouheen kiviaineksen rakeisuus (toimituserä 1)

Näyte: Ös / Pab -rouheen kiviaines



Seula	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3						KA
0,063	12,5	11,0	10,3						11,3
0,125	16	16	15						16
0,25	23	23	22						23
0,5	32	32	31						32
1	43	42	40						42
2	55	54	51						54
4	68	68	64						67
5,6	77	76	73						76
8	85	85	82						84
11,2	93	95	93						94
16	100	100	99						100
20	100	100	100						100
25	100	100	100						100
32	100	100	100						100

## PAB-rouheen rakeisuus (toimituserä 1)

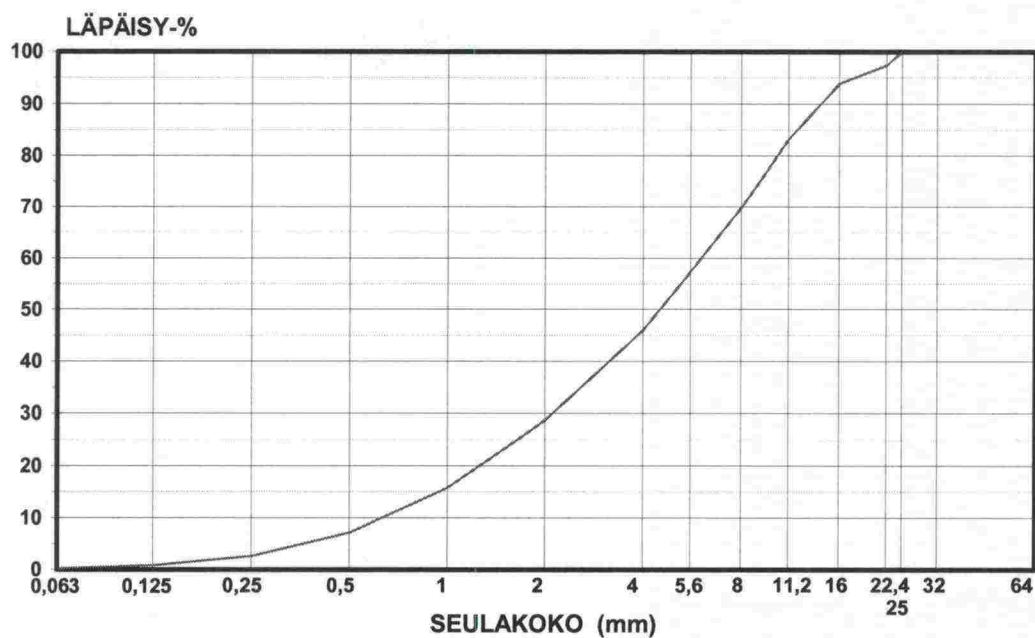
Näyte: Ös / Pab -rouhe

Rouheen massan tiheys 2515 ja 2519 kg/m<sup>3</sup>, ka 2517 kg/m<sup>3</sup>

Sideainepitoisuus 4.5 % ( kolmen määrittelyn keskiarvo )

Sideaineen tunkeuma +25 asteessa = 143 [1/10mm]

( Rouheen kosteus tullessa 2.3 % )



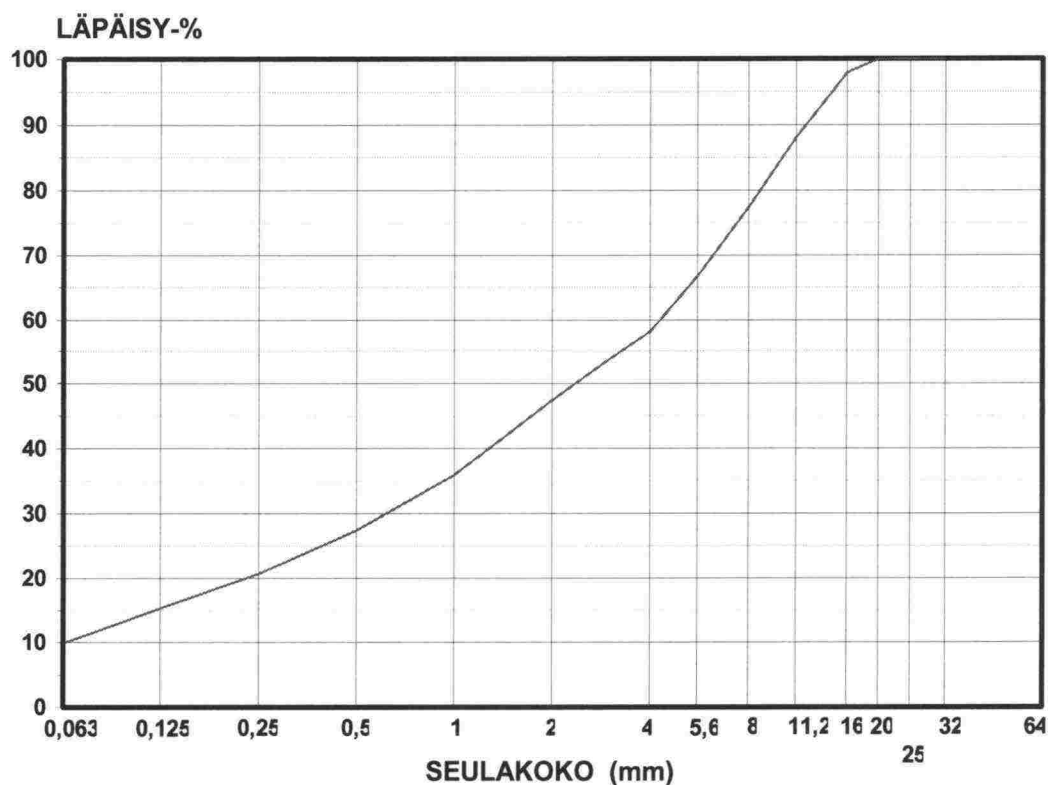
Seula	Näyte 1	Näyte 2							KA
0,063	0,2	0,3							0,2
0,125	1	1							1
0,25	2	3							3
0,5	7	7							7
1	16	15							16
2	30	27							29
4	47	44							46
5,6	58	56							57
8	70	69							70
11,2	83	83							83
16	93	96							94
22,4	97	99							97
25	100	100							100
32	100	100							100

# PAB-rouheen kiviaineksen rakeisuus (toimituserä 2)

Näyte:

1 Pab- rouhe 10/05 Skanska Bit. % 2,9  
Rouheen sisältämän kiviaineksen rakeisuus

2 Pab-rouhe 10/05 Skanska bit. 3.0 %



Seula	Näyte 1	Näyte 2							KA
0,063	10,6	9							9,8
0,125	16	15							15
0,25	21	20							21
0,5	28	27							27
1	36	36							36
2	47	48							47
4	58	58							58
5,6	67	67							67
8	77	77							77
11,2	90	86							88
16	99	96							98
20	100	100							100
25	100	100							100
32	100	100							100



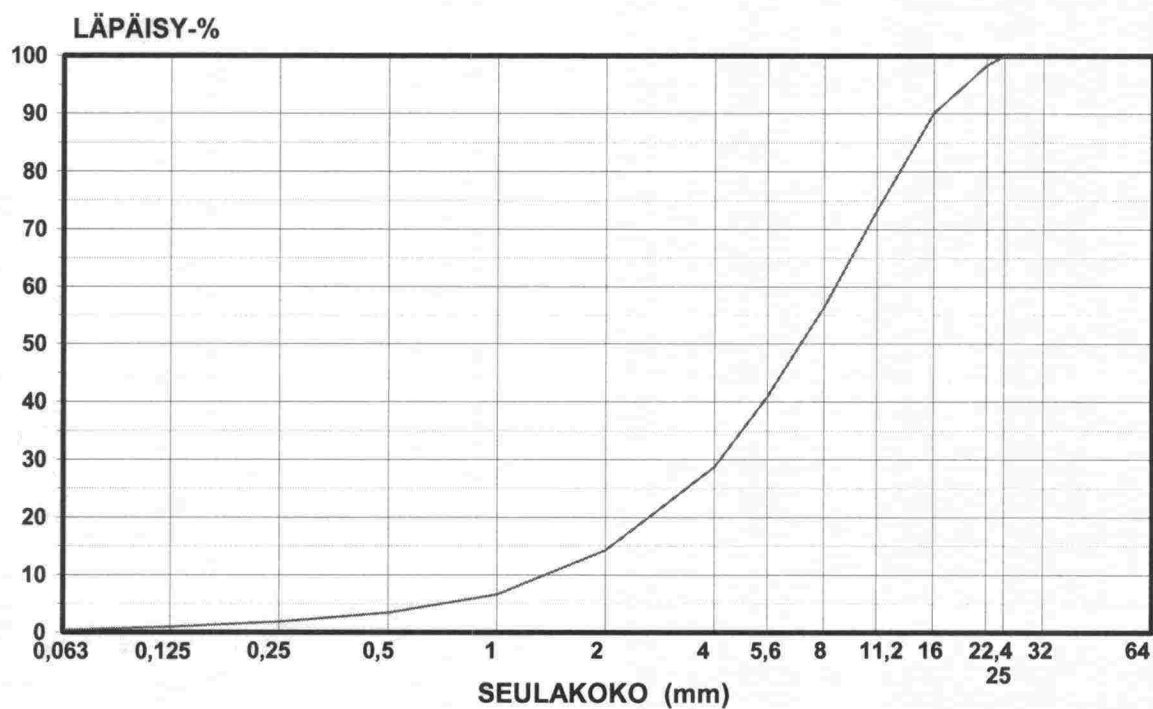
## AB-rouheen rakeisuus

Näyte: AB -rouhe

Rouheen sideainepitoisuus 5.1 % ( kolmen määrittelyn keskiarvo )

Sideaineen tunkeuma +25 asteessa 85 [1/10mm]

( Rouheen kosteus tullessa 3.2 % )



Seula	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3						KA
0,063	0,5	0,4	0,5						0,4
0,125	1	1	1						1
0,25	2	1	2						2
0,5	5	2	3						3
1	9	5	5						7
2	17	14	10						14
4	32	31	21						29
5,6	44	46	31						41
8	58	63	46						56
11,2	75	79	65						73
16	91	94	85						90
22,4	99	99	97						98
25	100	100	100						100
32	100	100	100						100

**REST-massan rakeisuus A (rouhe-erä 1)**

Rouheen kiviaineksen ja lisäkiviaineksen yhdistetty rakeisuus  
rouhetta 50 % kiviainesten ja rouheen yhteismäärästä

Massa: REST, ohjekäyrä A, Ös/PAB -rouhe 50 %, rouhe-erä 1

Sideaine: B 160/220 emulsiona ( Akzo

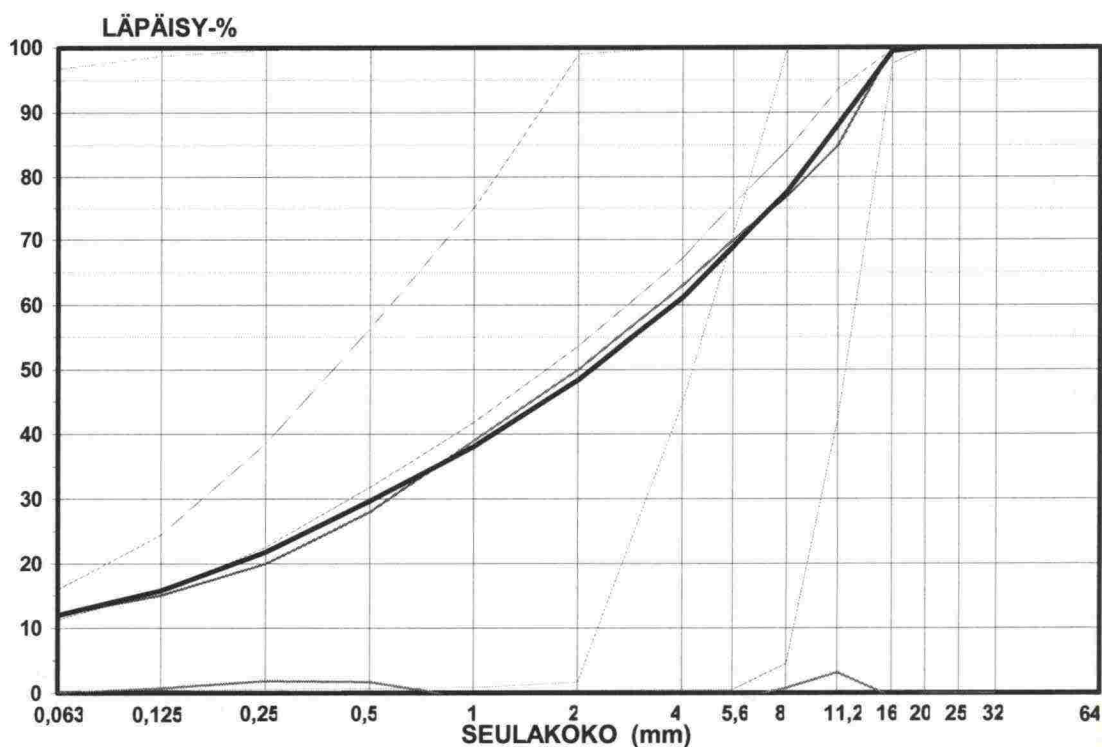
Täytejauhe:

Lisäaineet:

Kiviaines: KaM Teisko 2004 + Ös/PAB -rouhe 50 %

Muuta:

Massan tiheys:



			Tiheydet: 2607		2517	2653	2728	2718	2677	
			Seososuudet: 100,0 %		50,0 %	3,5 %	18,0 %	13,5 %	15,0 %	
Seula	Erotus	Ohje	Seos	Ös/PAB	Seos 1	T 0/2	T 2/8	T 8/16		
0,063	0,0	12	12,0	11,3	96,7	15,9	0,3	0,2		
0,125	0,7	15	15,7	15,5	98,7	24,5	0,4	0,3		
0,25	1,9	20	21,9	22,6	99,6	38,6	0,6	0,3		
0,5	1,7	28	29,7	31,8	99,9	56,4	0,7	0,4		
1	-0,9	39	38,1	41,9	100	75,2	0,8	0,4		
2	-1,6	50	48,4	53,6	100	99	1,6	0,4		
4	-1,8	63	61,2	67,1	100	100	44,8	0,5		
5,6	-1,0	70	69,0	75,7	100	100	70,9	0,5		
8	0,7	77	77,7	84,2	100	100	99,7	4,5		
11,2	3,2	85	88,2	93,7	100	100	100	42,2		
16	-0,6	100	99,4	99,6	100	100	100	97,5		
20	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100		
25	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100		
32	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100		

**REST-massan rakeisuus B (rouhe-erä 1)**

Rouheen kiviaineksen ja lisäkiviaineksen yhdistetty rakeisuus

rouhetta 50 % kiviainesten ja rouheen yhteismäärästä

**Massa:** REST, ohjekäyrä B, Ös/PAB -rouhe 50 %, rouhe-erä 1

**Sideaine:** B 160/220 emulsiona ( Akzo N

**Täytejauhe:** Seos 1 Teisko

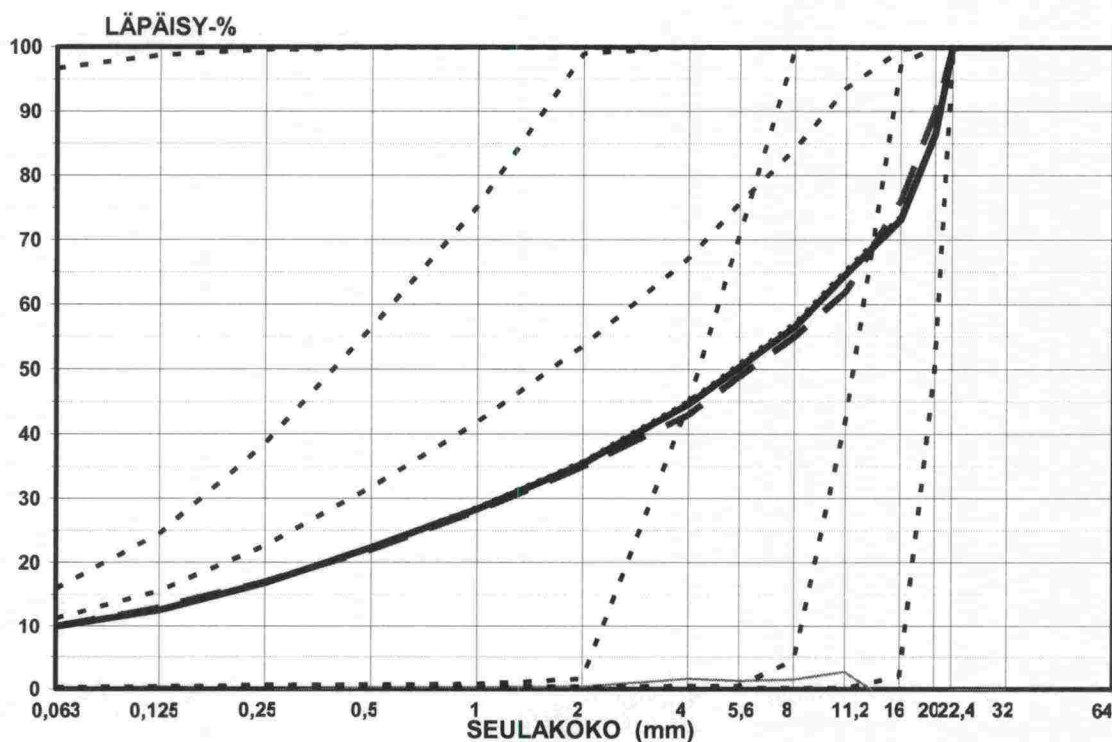
**Lisäaineet:** Rouheen SAP = 4,5%, kosteus tullessa 2,3%

Rouheen bitumin tunkeuma 143

**Kiviaines:** KaM Teisko 2004 + Ös/PAB -rouhe 50 %

**Muuta:** Rouheen kiviaineksen rakeisuus

**Massan tiheys:**



**Tiheydet:** 2598

2517

2653

2728

2718

2674

2677

**Seososuudet:** 100,0 %

50,0 %

3,5 %

5,0 %

5,5 %

9,0 %

27,0 %

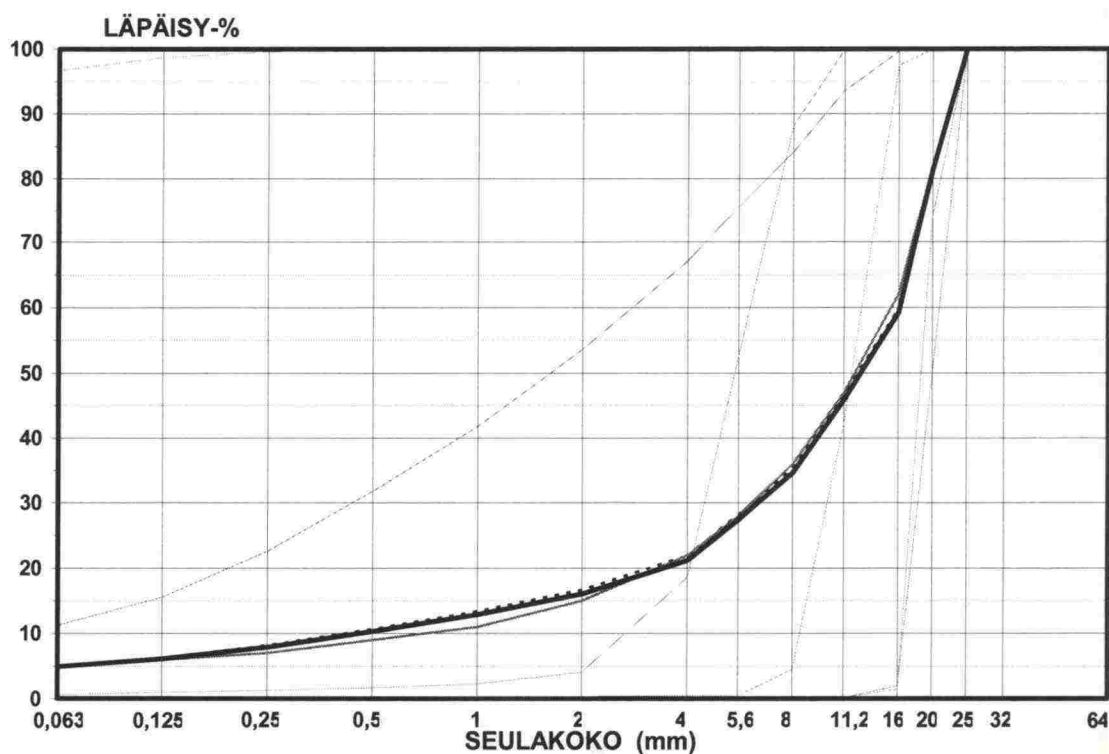
Seula	Erotus	Ohje	Seos	Ös/PAB	Seos 1	T 0/2	T 2/8	T 8/16	T 16/22.4
0,063	-0,1	10	9,9	11,3	96,7	15,9	0,3	0,2	0,2
0,125	-0,4	13	12,6	15,5	98,7	24,5	0,4	0,3	0,2
0,25	-0,2	17	16,8	22,6	99,6	38,6	0,6	0,3	0,2
0,5	0,3	22	22,3	31,8	99,9	56,4	0,7	0,4	0,2
1	0,3	28	28,3	41,9	100	75,2	0,8	0,4	0,2
2	0,4	35	35,4	53,6	100	99	1,6	0,4	0,2
4	1,6	43	44,6	67,1	100	100	44,8	0,5	0,2
5,6	1,4	49	50,4	75,7	100	100	70,9	0,5	0,2
8	1,5	55	56,5	84,2	100	100	99,7	4,5	0,2
11,2	2,7	62	64,7	93,7	100	100	100	42,2	0,2
16	-2,9	76	73,1	99,6	100	100	100	97,5	2
20	-3,5	90	86,5	100	100	100	100	100	50
22,4	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100	100
32	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100	100



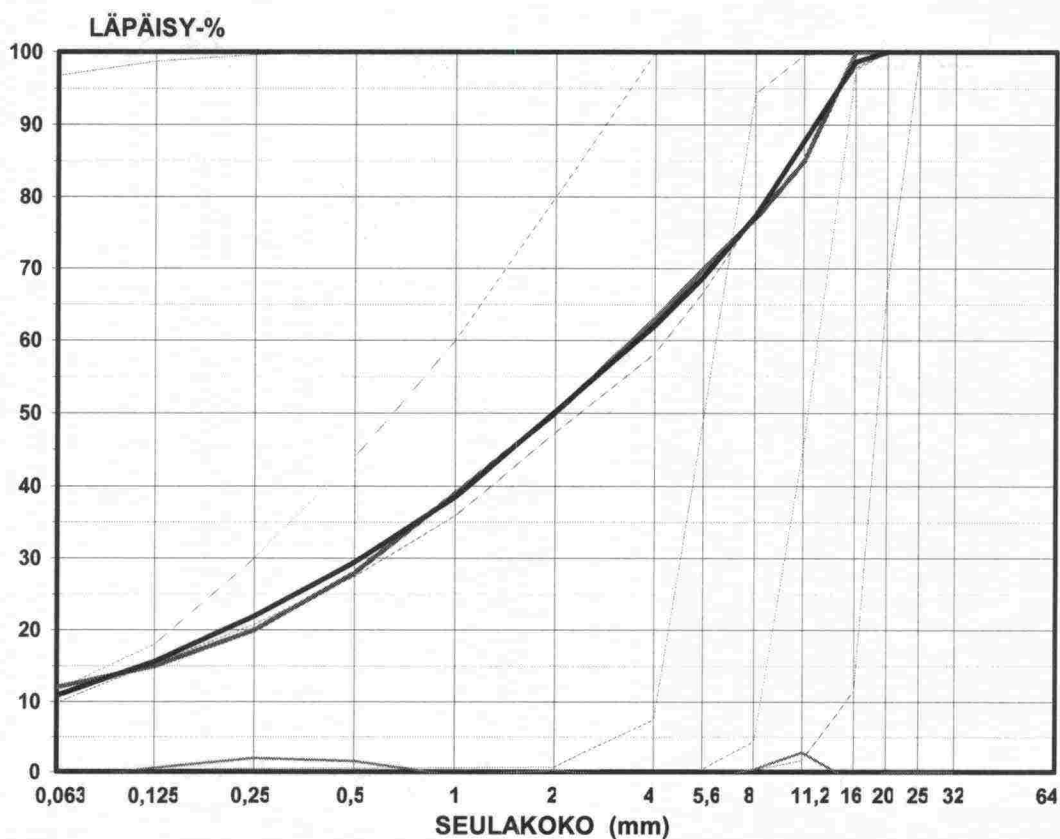
**REST-massan rakeisuus C (rouhe-erä 1)**

Rouheen kiviaineksen ja lisäkiviaineksen yhdistetty rakeisuus

rouhetta 25 % kiviainesten ja rouheen yhteismäärästä

**Massa:** REST ohjekäyrä C, Ös/PAB -rouhe-erä 1**Sideaine:** emulsio Akzo Nobel ( B160/220 )**Täytejauhe:** Seos 1: " Teisko "**Lisäaineet:** ei**Kiviaines:** KaM Teisko 2004**Muuta:** Ös/PAB -rouheen kiviaineksen rakeisuus**Massan tiheys:**

			Tiheydet: 2639      2517      2653      2718      2674      2677      2677							
			Seososuudet: 100,0 %    25,0 %    2,0 %    12,0 %    20,0 %    33,0 %    8,0 %							
Seula	Erotus	Ohje	Seos	Ös/PAB	Seos 1	T 3/8	T 8/16	T 16/22.4	T 16/25	
0,063	-0,1	5	4,9	11,3	96,7	0,6	0,2	0,2	0,1	
0,125	0,1	6	6,1	15,5	98,7	1,0	0,3	0,2	0,1	
0,25	0,9	7	7,9	22,6	99,6	1,3	0,3	0,2	0,1	
0,5	1,3	9	10,3	31,8	99,9	1,7	0,4	0,2	0,1	
1	1,9	11	12,9	42	100	2,3	0,4	0,2	0,1	
2	1,0	15	16,0	54	100	4,1	0,4	0,2	0,1	
4	-0,8	22	21,2	67	100	18,6	0,5	0,2	0,1	
5,6	-0,6	28	27,4	76	100	52,6	0,5	0,2	0,1	
8	-1,4	36	34,6	84	100	88,2	4,5	0,2	0,2	
11,2	-1,1	47	45,9	94	100	100	42,2	0,2	0,2	
16	-2,8	62	59,2	100	100	100	97,5	2	1,5	
20	-0,6	82	81,4	100	100	100	100	50	74,2	
25	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100	100	
32	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100	100	

**REST-massan rakeisuus A, (rouhe-erä 2), lisäko****Massa: REST R1****Sideaine: Skanska emulsio (erä11/200)****Täytejauhe: Seos 1: " Teisko "****Lisäaineet:****Kiviaines:****Muuta: A-käyrä****laskan tiheys:**

				Tiheydet: 2619	2653	2714	2716	2678	2680	2541
				Seososuudet: 100,0 %	2,5 %	30,0 %	6,0 %	11,5 %	0,0 %	50,0 %
Seula	Erotus	Ohje	Seos	Seos 1	T 0/4 -05A	4/8 -05A	8/16 -05A	16/22.4 -0	PAB rou	
0,063	-1,2	12	10,8	96,7	11,6	0,2	0,1	0,1	10	
0,125	0,6	15	15,6	98,7	18	0	0	0	15	
0,25	1,9	20	21,9	99,6	30	0	0	0	21	
0,5	1,5	28	29,5	99,9	44	1	0	0	27	
1	-0,5	39	38,5	100	60	1	0	0	36	
2	0,3	50	50,3	100	80	1	0	0	47	
4	-0,9	63	62,1	100	100	7	0	0	58	
5,6	-1,1	70	68,9	100	100	49	0	0	67	
8	0,4	77	77,4	100	100	94	4	0	77	
11,2	2,7	85	87,7	100	100	100	45	2	88	
16	-1,3	100	98,7	100	100	100	98	12	98	
20	0,0	100	100,0	100	100	100	100	67	100	
25	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100	100	
32	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100	100	

## REST-massan rakeisuus B, (rouhe-erä 2), lisäkoe

Massa: REST R4

Sideaine: Skanska emulsio (erä11/200

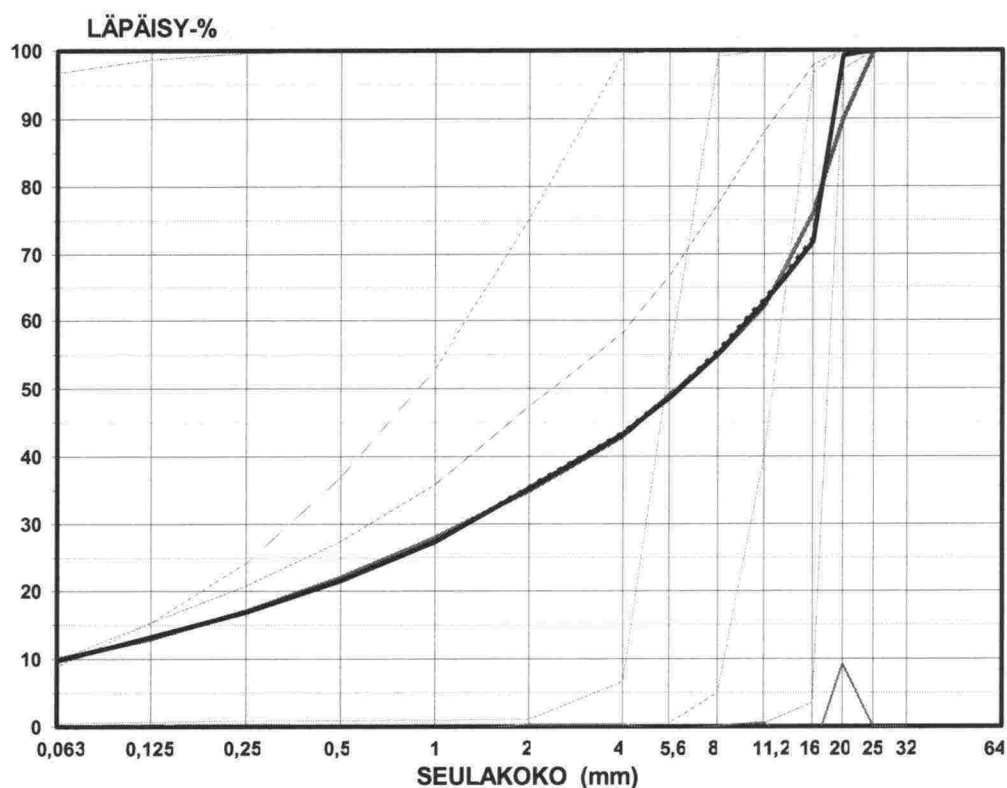
Täytejauhe: Seos 1: " Teisko "

Lisäaineet:

Kiviaines: 2005 B

Muuta: B-käyrä

Iassin tiheys:



Tiheydet: 2611			2653	2714	2716	2678	2680	2541	
Seososuudet: 100,0 %			4,0 %	10,0 %	2,0 %	6,0 %	28,0 %	50,0 %	
Seula	Erotus	Ohje	Seos	Seos 1	0/4 -05E	4/8 -05E	8/16 -05E	16/22.4 -0	PAB rou
0,063	-0,3	10	9,7	96,7	8,9	0,5	0,3	0,1	10
0,125	0,2	13	13,2	98,7	15	1	0	0	15
0,25	-0,1	17	16,9	99,6	24	1	0	0	21
0,5	-0,5	22	21,5	99,9	37	1	0	0	27
1	-0,7	28	27,3	100	53	1	0	0	36
2	0,3	35	35,3	100	75	1	1	0	47
4	0,3	43	43,3	100	99,53839	7	1	0	58
5,6	-0,4	49	48,6	100	99,98154	54	1	0	67
8	0,1	55	55,1	100	100	99	5	0	77
11,2	0,6	62	62,6	100	100	100	40	0	88
16	-4,3	76	71,7	100	100	100	97	4	98
20	9,2	90	99,2	100	100	100	100	97	100
25	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100	100
32	0,0	100	100,0	100	100	100	100	100	100



## Remix -stabiloinnissa käytetyn emulsion pisarakokojakautuma

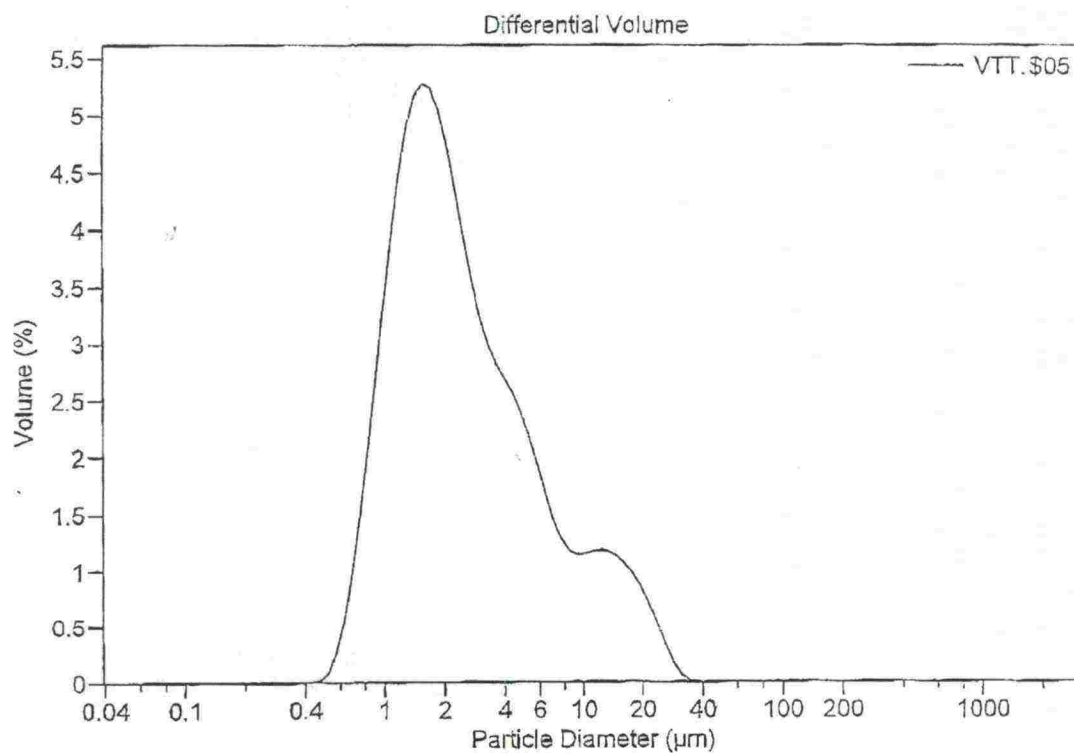


LS 1 Particle Size Analyzer

19 Nov 2004

Akzo Nobel Asphalt Applications

File name:	VTT.\$05	Group ID:	VTT
Run number:	5		
Optical model:	Bitumen.rfd PIDS included		
LS 230	Fluid Module		
Start time:	15:05 19 Nov 2004	Run length:	60 seconds
Pump speed:	20		
Obscuration:	14%	PIDS Obscur:	74%
Software:	3.01	Firmware:	2.02 0



## Volume Statistics (Arithmetic)

VTT.\$05

Calculations from 0.0400 µm to 2000 µm

Volume:	100%	S.D.:	4.723 µm
Mean:	4.076 µm	C.V.:	116%
Median:	2.204 µm	Skewness:	2.519 Right skewed
D(3,2):	1.970 µm	Kurtosis:	6.703 Leptokurtic
Mode:	1.592 µm		

% <	10	25	50	75	90
µm	1.009	1.394	2.204	4.459	10.21

## VBST-massan vedenkestävyys, näytekohtaiset tulokset

Ikä 23+3 d, T= 10 °C

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Bit. pit	Tart. pit.	Vesi- pit.	Sek. lämpöt.	Proct. tiiv.	Tiiv. ICT200r	Näyte		Halk.veto- lujuus	Halk.veto- jäykkyys
			%	%	%	°C	%	%	nro		kPa	MPa
V1-A	A	B 160/220	4,2	0,5	2,5	20-23	98		222	ku	970	117
									224	ku	1012	112
									226	ku	1046	123
									223	mä	474	62
									225	mä	436	57
									227	mä	575	67
									ka	ku	1009	117
									ka	mä	495	62
V1-A	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys [%])										<b>49</b>	<b>53</b>
V2-A	A	B 160/220	4,2	0,5	2,5	20-23	95	96	X77	ku	767	88
									X79	ku	856	98
									X81	ku	812	88
									X76	mä	383	42
									X78	mä	485	55
									X80	mä	481	52
									ka	ku	812	91
									ka	mä	450	50
V2-A	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys [%])										<b>55</b>	<b>55</b>
V3-A	A	B 160/220	5,2	0,5	2,5	20-23	98		240	ku	1234	125
									242	ku	1240	136
									244	ku	1273	128
									239	mä	710	75
									241	mä	755	82
									243	mä	751	74
									ka	ku	1249	130
									ka	mä	739	77
V3-A	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys [%])										<b>59</b>	<b>59</b>
V4-A	A	B 160/220	5,2	0,5	2,5	20-23	95	96	X91	ku	1075	103
									X93	ku	1096	112
									X95	ku	1045	118
									X92	mä	500	60
									X94	mä	550	61
									X96	mä	547	69
									ka	ku	1072	111
									ka	mä	533	63
V4-A	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys [%])										<b>50</b>	<b>57</b>
V5-B	B	B 160/220	3,5	0,5	2,6	20-23	95		160	ku	798	99
									162	ku	852	102
									163	ku	844	116
									159	mä	401	49
									161	mä	378	53
									164	mä	376	48
									ka	ku	832	106
									ka	mä	385	50
V5-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys [%])										<b>46</b>	<b>47</b>
V6-B	B	B 160/220	4,0	0,5	2,5	20-23	85		168	ku	315	23
									170	ku	334	36
									171	ku	325	33
									167	mä	95	10
									169	mä	163	16
									172	mä	165	17
									ka	ku	325	31
									ka	mä	141	14
V6-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys [%])										<b>43</b>	<b>47</b>

**VBST-massan vedenkestävyys, näytekohtaiset tulokset (jatkoa)**

Ikä 23+3 d, T= 10 °C

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Bit. pit.	Tart. pit.	Vesipi. t.	Sek. lämpöt.	Proct. tiiv.	Tiiv. ICT200r	Näyte		Halk.veto- lujuus	Halk.veto- jäykkyys
			%	%	%	°C	%	%	nro		kPa	MPa
V7-B	B	B 160/220	4,0	0,5	2,5	20-23	90		175	ku	623	68
									177	ku	554	61
									179	ku	607	55
									176	mä	266	31
									178	mä	313	32
									180	mä	281	27
									ka	ku	595	61
									ka	mä	287	30
V7-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys [%])										<b>48</b>	<b>50</b>
V8-B	B	B 160/220	4,0	0,5	2,5	20-23	95		183	ku	835	88
									185	ku	988	102
									187	ku	1097	125
									184	mä	597	72
									186	mä	626	69
									188	mä	500	67
									ka	ku	974	105
									ka	mä	574	69
V8-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys [%])										<b>59</b>	<b>66</b>
V10-B	B	B 160/220	5,0	0,5	2,5	20-23	95		201	ku	953	89
									203	ku	1054	96
									204	ku	1094	90
									200	mä	701	68
									202	mä	690	74
									205	mä	754	81
									ka	ku	1034	92
									ka	mä	715	75
V10-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys [%])										<b>69</b>	<b>81</b>
V11-B	B	B 160/220	4,5	0,5	2,5	60	95		211	ku	922	82
									213	ku	1079	112
									215	ku	1034	92
									212	mä	787	74
									214	mä	762	76
									216	mä	715	74
									ka	ku	1012	95
									ka	mä	755	75
V11-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys [%])										<b>75</b>	<b>79</b>
V12-B	B	B 160/220	3,4	0,5	2,5	20-23	95		251	ku	886	80
									253	ku	860	88
									254	ku	768	74
									250	mä	537	60
									252	mä	544	58
									255	mä	394	42
									ka	ku	838	81
									ka	mä	492	53
V12-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys [%])										<b>59</b>	<b>66</b>
V13-B	B	B 70/100	4,0	0,5	2,5	20-23	95		259	ku	899	136
									261	ku	1010	135
									262	ku	877	108
									258	mä	461	69
									260	mä	395	64
									263	mä	526	68
									ka	ku	929	126
									ka	mä	461	67
V13-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys [%])										<b>50</b>	<b>53</b>



Liite 15c

**VBST-massan vedenkestävyys, näytekohtaiset tulokset (jatkoa)**

Ikä 23+3 d, T= 10 °C

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Bit. pit %	Tart. pit. %	Vesipi t. %	Sek. lämpöt. °C	Proct. tiiv. %	Tiiv. ICT200r %	Näyte		Halk.veto- lujuus kPa	Halk.veto- jäykkyys MPa
									nro			
V14-B	B	B 650/900	4,0	0,5	2,5	20-23	95		273	ku	303	30
									275	ku	354	35
									276	ku	334	33
									272	mä	286	22
									274	mä	334	23
									277	mä	300	19
									ka	ku	330	33
									ka	mä	307	21
V14-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys [%])										<b>93</b>	<b>65</b>
V15-C	C	B160/220	3,3	0,5	2,8	20-23	100		290	ku	648	80
									292	ku	650	73
									293	ku	809	90
									289	mä	449	54
									291	mä	446	48
									294	mä	566	71
									ka	ku	702	81
									ka	mä	487	57
V15-C	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys [%])										<b>69</b>	<b>71</b>
V16-C	C	B160/220	3,3	0,5	2,8	20-23	97	96	X105	ku	668	54
									X107	ku	574	44
									X112	ku	481	49
									X106	mä	420	37
									X109	mä	355	33
									X113B	mä	420	31
									ka	ku	574	49
									ka	mä	398	34
V16-C	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys [%])										<b>69</b>	<b>69</b>

# Liite 16a

## REST-massan vedenkestävyys, näytekohtaiset tulokset

Ikä 28 + 3 d, T= 10 °C, Bitumi: B160/220 emulgoituna

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Lisäbit. pit	Teholl. bit.pit.	Rouhe- tyyppi	Rouhe- pit.	Kok.- vesipit.	Proct. tiiv.	Tiiv. ICT200r	Näyte (kuiva / märkä)		Halk.veto- lujuus	Halk.veto- jäykkyys
			%	%		%	%	%	%	nro		kPa	MPa
R1-A	A	B 160/220 emulsio	2,1	4,1	PAB-B Toimitus- erä 1	50	2,8	94		307	ku	410	33
										309	ku	421	39
										311	ku	369	35
										306	mä	176	14
										308	mä	163	16
										310	mä	190	16
										ka	ku	400	36
										ka	mä	176	15
R1-A	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]											44	43
R2-A	A	B 160/220 emulsio	3,0	4,3	PAB-B Toimitus- erä 2	50	4,4	101	96	X44	ku	819	70
										X46	ku	865	76
										X48	ku	868	81
										X43	mä	529	45
										X45	mä	571	55
										X47	mä	551	53
										ka	ku	850	76
										ka	mä	550	51
R2-A	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]											65	67
R5-B	B	B 160/220 emulsio	1,3	3,3	PAB-B Toimitus- erä 1	50	2,3	93		324	ku	275	26
										326	ku	320	33
										328	ku	280	29
										323	mä	125	10
										325	mä	137	12
										327	mä	140	14
										ka	ku	292	29
										ka	mä	134	12
R5-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]											46	41
R6-B	B	B 160/220 emulsio	1,8	3,8	PAB-B Toimitus- erä 1	50	2,6	89		331	ku	197	18
										333	ku	229	19
										335	ku	231	20
										332	mä	139	12
										334	mä	135	15
										336	mä	128	14
										ka	ku	219	19
										ka	mä	134	14
R6-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]											61	72
R7-B	B	B 160/220 emulsio	1,8	3,8	PAB-B Toimitus- erä 1	50	2,6	93		339	ku	344	31
										341	ku	299	27
										343	ku	322	27
										340	mä	234	16
										342	mä	188	19
										344	mä	195	18
										ka	ku	322	28
										ka	mä	206	18
R7-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]											64	63
R8-B	B	B 160/220 emulsio	2,7	4,0	PAB-B Toimitus- erä 2	50	4,2	101	96	X57	ku	771	83
										X59	ku	835	73
										X75	ku	786	80
										X54	mä	676	61
										X56	mä	571	52
										X58	mä	548	49
										ka	ku	797	79
										ka	mä	598	54
R8-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]											75	68

## REST-massan vedenkestävyys, näytekohtaiset tulokset

Ikä 23+3 d, T= 10 °C

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Lisäbit. pit	Teholl. bit.pit.	Rouhe- tyyppi	Rouhe- pit.	Kok.- vesipit.	Proct. tiiv.	Tiiv. ICT200r	Näyte (kuiva / märkä)		Halk.veto- lujuus	Halk.veto- jäykkyys
			%	%		%	%	%	%	nro		kPa	MPa
R11-B	B	B 160/220 emulsio	2,8	4,8	PAB-B Toimitus- erä 1	50	3,3	93		357	ku	500	34
										359	ku	505	36
										361	ku	506	40
										356	mä	344	22
										358	mä	428	34
										360	mä	362	31
										ka	ku	503	37
										ka	mä	378	29
R11-B Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]												75	79
R12-B	B	B 160/220 emulsio	3,6	4,6	PAB-B Toimitus- erä 1	25	4,5	92		367	ku	537	30
										369	ku	527	41
										371	ku	564	39
										368	mä	374	29
										370	mä	411	32
										372	mä	385	29
										ka	ku	543	37
										ka	mä	390	30
R12-B Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]												72	81
R13-B	B	B 160/220 emulsio	2,0	3,7	AB	50	2,8	93		375	ku	599	48
										377	ku	608	61
										379	ku	635	66
										376	mä	359	32
										378	mä	389	41
										380	mä	390	44
										ka	ku	614	58
										ka	mä	379	39
R13-B Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]												62	67
R14-C	C	B 160/220 emulsio	2,5	3,5	PAB-B Toimitus- erä 1	25	3,8	94		383	ku	521	48
										385	ku	584	61
										387	ku	538	56
										384	mä	385	43
										386	mä	425	44
										388	mä	395	35
										ka	ku	548	55
										ka	mä	402	40
R14-C Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]												73	73



**KOST-massan vedenkestävyys, näytekohtaiset tulokset**

Ikä 28+3d, T= 10 °C

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Bit. pit %	SR- sem %	Vesi- pit. %	Proct.t iiv. %	Näyte nro	Halk.veto- lujuus kPa	Halk.veto- jäykkyys MPa
K1-A	A	B 160/220	3,2	1,1	4,3	95	401 ku	888	299
							403 ku	910	255
							405 ku	862	286
							400 mä	588	165
							402 mä	620	159
							404 mä	562	139
							ka kuivat	887	280
							ka märät	590	154
Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]								<b>67</b>	<b>55</b>
K2-B	B	B 160/220	2,5	1,0	3,8	95	417 ku	711	146
							419 ku	786	197
							421 ku	779	221
							418 mä	493	103
							420 mä	421	111
							422 mä	441	105
							ka kuivat	759	188
							ka märät	452	106
Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]								<b>60</b>	<b>57</b>
K3-B	B	B 160/220	3,0	1,5	3,3	95	425 ku	1090	267
							427 ku	1098	301
							429 ku	1192	265
							426 mä	802	210
							428 mä	920	258
							430 mä	761	219
							ka kuivat	1126	278
							ka märät	828	229
Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]								<b>73</b>	<b>82</b>
K4-B	B	B 160/220	3,0	1,0	3,2	90	433 ku	575	119
							435 ku	617	145
							437 ku	577	108
							434 mä	329	68
							436 mä	301	58
							438 mä	311	74
							ka kuivat	590	124
							ka märät	313	67
Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]								<b>53</b>	<b>54</b>
K5-B	B	B 160/220	3,0	1,0	3,2	95	442 ku	710	194
							444 ku	710	139
							446 ku	935	212
							441 ku	508	119
							443 ku	577	120
							445 ku	617	163
							ka kuivat	785	182
							ka märät	567	134
Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]								<b>72</b>	<b>74</b>

**KOST-massan vedenkestävyys, näytekohtaiset tulokset**

Ikä 28+3d, T= 10 °C

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Bit. pit	SR- sem	Vesi- pit.	Proct.t iiv.	Näyte	Halk.veto- lujuus	Halk.veto- jäykkyys
			%	%	%	%	nro	kPa	MPa
K7-B	B	B 160/220	3,0	2,0	3,4	95	459 ku	1291	376
							461 ku	1344	352
							463 ku	1348	383
							458 mä	1065	244
							460 mä	1093	310
							462 mä	1092	318
							ka kuivat	1328	370
							ka märät	1083	291
K7-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]							<b>82</b>	<b>79</b>
K8-B	B	B 160/220	4,0	1,0	2,2	95	473 ku	1048	199
							475 ku	975	170
							477 ku	1066	224
							472 mä	689	144
							474 mä	827	150
							476 mä	838	163
							ka kuivat	1030	198
							ka märät	784	152
K8-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]							<b>76</b>	<b>77</b>
K9-B	B	B 70/100	2,6	0,9	2,1	95	489 ku	849	172
							491 ku	869	165
							493 ku	840	215
							490 mä	577	100
							492 mä	636	131
							494 mä	575	133
							ka kuivat	853	184
							ka märät	596	121
K9-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]							<b>70</b>	<b>66</b>
K10-B	B	B 650/900	3,0	1,0	3,2	95	503 ku	737	187
							505 ku	774	228
							507 ku	763	214
							504 mä	526	124
							506 mä	394	82
							508 mä	539	140
							ka kuivat	758	210
							ka märät	487	115
K10-B	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]							<b>64</b>	<b>55</b>
K11-C	C	B 160/220	2,5	0,8	4,0	95	515 ku	434	88
							517 ku	518	116
							519 ku	426	73
							514 mä	218	43
							516 mä	242	47
							518 mä	235	48
							ka kuivat	459	92
							ka märät	231	46
K11-C	Tarttuvuusluku (vedenkestävyys) [%]							<b>50</b>	<b>50</b>

## VBST-massan pakkasenkestävyys, näytekohtaiset tulokset

Pakkasenkestävyys = Jäävä lujuus (%) jäädytys-sulatusrasituksen jälkeen

Jäädytys -20 °C ilmassa, sulatus +20 °C vedessä, syklejä 20 kpl

Pakkassyklit aloitettu, kun ikä = 23 d. Halkaisuvetolujuuskokeessa T= 10 °C

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Bit. pit	Tart. pit.	Vesipi t.	Sek. lämpöt.	Proct. tiiv.	Tiiv. ICT200r	Näyte (refer. / vanh.)		Halk.veto- lujuus 10°C	Halk.veto- jäykkyys 10°C
			%	%	%	°C	%	%	nro		kPa	MPa
V1-A	A	B160/220	4,2	0,5	2,5	20-23	98		229	refer.	985	112
									231	refer.	1000	117
									233	refer.	989	116
									228	vanh.	690	68
									230	vanh.	698	70
									232	vanh.	738	72
									ka	refer.	992	115
V1-A									ka	vanh.	709	70
											71	61
V8-B	B	B160/220	4,0	0,5	2,5	20-23	95		194	refer.	900	92
									195	refer.	973	90
									196	refer.	970	101
									191	vanh.	593	60
									192	vanh.	515	51
									193	vanh.	650	66
									ka	refer.	948	94
V8-B									ka	vanh.	586	59
											62	63
V13-B	B	B70/100	4,0	0,5	2,5	20-23	95		265	refer.	690	101
									267	refer.	703	96
									269	refer.	644	90
									264	vanh.	554	62
									266	vanh.	565	67
									268	vanh.	516	61
									ka	refer.	679	95
V13-B									ka	vanh.	545	63
											80	66
V14-B	B	B650/900	4,0	0,5	2,5	20-23	95		279	refer.	432	38
									281	refer.	378	38
									283	refer.	412	31
									278	vanh.	412	35
									280	vanh.	386	30
									282	vanh.	381	30
									ka	refer.	407	36
V14-B									ka	vanh.	393	32
											97	89
V15-C	C	B160/220	3,3	0,5	2,8	20-23	100		296	refer.	701	73
									298	refer.	712	83
									300	refer.	868	85
									295	vanh.	683	65
									297	vanh.	704	70
									299	vanh.	689	73
									ka	refer.	761	80
V15-C									ka	vanh.	692	69
											91	86



**REST-massan pakkasenkestävyys, näytekohtaiset tulokset**

Pakkasenkestävyys = Jäävä lujuus (%) jäädytys-sulatusrasituksen jälkeen

Jäädytys -20 °C ilmassa, sulatus +20 °C vedessä, syklejä 20 kpl

Pakkassyklit aloitettu, kun ikä = 28 d. Halkaisuvetolujuuskokeessa T= 10 °C

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Lisäbit. pit	Teholl. bit.pit.	Rouhe- tyyppi	Rouhe- pit.	Kok.- vesipit.	Proct. tiiv.	Tiiv. ICT200r	Näyte (refer. / vanh.)		Halk.veto- lujuus 10°C	Halk.veto- jäykkyys 10°C
			%	%		%	%	%	%	nro		kPa	MPa
R1-A	A	B 160/220 emulsio	2,1	4,1	PAB-B Toimitus- erä 1	50	2,8	94		313	refer.	327	30
										315	refer.	312	29
										317	refer.	292	27
										312	vanh.	215	16
										314	vanh.	226	15
										316	vanh.	241	19
										ka	refer.	310	29
										ka	vanh.	228	17
R1-A	Pakkasenkestävyys (jäävä halk.lujuus tai -jäykkyys) [%]											73	58
R2-A	A	B 160/220 emulsio	3,0	4,3	PAB-B Toimitus- erä 2	50	4,4	101	96	A4	refer.	787	64
										A5	refer.	756	59
										A6	refer.	786	64
										A1	vanh.	530	37
										A2	vanh.	497	39
										A3	vanh.	434	32
										ka	refer.	776	63
										ka	vanh.	487	36
R2-A	Pakkasenkestävyys (jäävä halk.lujuus tai -jäykkyys) [%]											63	58
R7-B	B	B 160/220 emulsio	1,8	3,8	PAB-B Toimitus- erä 1	50	2,6	93		346	refer.	336	27
										348	refer.	349	27
										350	refer.	328	30
										345	vanh.	225	18
										347	vanh.	256	22
										349	vanh.	225	16
										ka	refer.	338	28
										ka	vanh.	235	19
R7-B	Pakkasenkestävyys (jäävä halk.lujuus tai -jäykkyys) [%]											70	67
R8-B	B	B 160/220 emulsio	2,7	4,0	PAB-B Toimitus- erä 2	50	4,2	101	96	A11	refer.	811	78
										A12	refer.	801	62
										A13	refer.	858	79
										A8	vanh.	633	54
										A9	vanh.	701	62
										A10	vanh.	625	53
										ka	refer.	823	73
										ka	vanh.	653	56
R8-B	Pakkasenkestävyys (jäävä halk.lujuus tai -jäykkyys) [%]											79	77
R14-C	C	B 160/220 emulsio	2,5	3,5	PAB-B Toimitus- erä 1	25	3,8	94		390	refer.	501	40
										392	refer.	485	40
										394	refer.	447	39
										389	vanh.	352	27
										391	vanh.	383	36
										393	vanh.	311	27
										ka	refer.	478	39
										ka	vanh.	349	30
R14-C	Pakkasenkestävyys (jäävä halk.lujuus tai -jäykkyys) [%]											73	76

## KOST-massan pakkasenkestävyys, näytekohtaiset tulokset

Pakkasenkestävyys = Jäävä lujuus (%) jäädytys-sulatusrasituksen jälkeen

Jäädytys -20 °C ilmassa, sulatus +20 °C vedessä, syklejä 20 kpl

Pakkassyklit aloitettu, kun ikä = 23 d. Halkaisuvetolujuuskokeessa  $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Bit. pit.	SR- sem	Vesi- pit.	Proct.ti v.	Koest. lämpöt.	Näyte (refer. / vanh.)		Halk.veto- lujuus 10°C	Halk.veto- jäykkyys 10°C
			%	%	%	%	°C	nro		kPa	MPa
K1-A	A	B 160/220	3,2	1,1	4,3	95	10	407	refer.	754	173
								409	refer.	608	139
								411	refer.	762	180
								406	vanh.	625	139
								408	vanh.	601	118
								410	vanh.	530	121
								ka	refer.	708	164
								ka	vanh.	585	126
Pakkaskestävyys (%)										83	77
K5-B	B	B 160/220	3,0	1,0	3,2	95	10	448	refer.	865	234
								450	refer.	712	161
								452	refer.	740	173
								447	vanh.	590	110
								449	vanh.	582	110
								451	vanh.	575	122
								ka	refer.	772	189
								ka	vanh.	582	114
K5-B Pakkaskestävyys (%)										75	60
K7-B	B	B 160/220	3,0	2,0	3,4	95	10	465	refer.	1327	355
								467	refer.	1321	346
								469	refer.	1320	346
								464	vanh.	1084	278
								466	vanh.	1017	276
								468	vanh.	1066	282
								ka	refer.	1323	349
								ka	vanh.	1056	278
K7-B Pakkaskestävyys (%)										80	80
K8-B	B	B 160/220	4,0	1,0	2,2	95	10	479	refer.	1190	216
								481	refer.	1043	221
								483	refer.	1213	223
								478	vanh.	855	143
								480	vanh.	642	84
								482	vanh.	686	116
								ka	refer.	1149	220
								ka	vanh.	728	114
K8-B Pakkaskestävyys (%)										63	52
K9-B	B	B 70/100	2,6	0,9	2,1	95	10	496	refer.	734	112
								498	refer.	733	93
								500	refer.	780	155
								495	vanh.	736	123
								497	vanh.	671	137
								499	vanh.	559	88
								ka	refer.	749	120
								ka	vanh.	655	116
K9-B Pakkaskestävyys (%)										87	97
K11-C	C	B 160/220	2,5	0,8	4,0	95	10	521	refer.	262	72
								523	refer.	231	48
								525	refer.	289	75
								520	vanh.	108	8
								522	vanh.	153	18
								524	vanh.	107	10
								ka	refer.	261	65
								ka	vanh.	123	12
K11-C Pakkaskestävyys (%)										47	19

## VBST-, REST- ja KOST-massojen suola-pakkasenkestävyys, näytekohtaiset tulokset

Suola-pakkasenkestävyys = Jäävä lujuus (%) suolapakkasrasituksen jälkeen

Jäädytys -20 °C ilmassa, sulatus +20 °C 1 %- suolavedessä, syklejä 20 kpl

Suola-pakkassyklit aloitettu, kun ikä = 28 d. Halkaisuvetolujuuskokeessa T= 10 °C

### VBST, koostumus V9-B

Koost. tunnus	Rakeisuus	Bitumilaji	Bit. pit.	Tart. pit.	Vesipit.	Sek. lämpöt.	Proct. tiiv.	Tiiv. ICT200r	Näyte (refer. / vanh.)		Halk.vetolujuus 10°C	Halk.vetojäykkyys 10°C
			%	%	%	°C	%	%	nro		kPa	MPa
V9-B	B	B160/220	4,0	0,5	2,5	20-23	94	96	X98	refer.	722	71
									X100	refer.	747	86
									X104	refer.	737	89
									X97	vanh.	419	36
									X99	vanh.	451	35
									X101	vanh.	450	33
									X102	vanh.	597	54
									X103	vanh.	504	43
									ka	refer.	735	82
									ka	vanh.	484	40
V9-B	Suola-pakkasenkest. (jäävä halk.lujuus tai -jäykkyys) [%]										66	49

### REST, koostumus R8-B

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Lisäbit. pit	Teholl. bit.pit.	Rouhe- tyyppi	Rouhe- pit.	Kok.- vesipit.	Proct. tiiv.	Tiiv. ICT200r	Näyte (refer. / vanh.)		Halk.veto- lujuus 10°C	Halk.veto- jäykkyys 10°C
			%	%		%	%	%	%	nro		kPa	MPa
R8-B	B	B 160/220 emulsio	2,7	4,0	PAB-B Toimitus- erä 2	50	4,2	101	96	X63	refer.	760	67
										X65	refer.	807	66
										X67	refer.	721	68
										X60	vanh.	555	46
										X62	vanh.	559	51
										X64	vanh.	599	48
										X66	vanh.	641	61
										X74	vanh.	527	43
										ka	refer.	763	67
										ka	vanh.	577	50
R8-B	Suola-pakkasenkestävyys (jäävä halk.lujuus tai -jäykkyys) [%]											76	74

### KOST, koostumus K6-B

Koost. tunnus	Rakeisuus	Bitumilaji	Bit. pit.	SR-sem	Vesipit.	Proct. tiiv.	Näyte (refer. / vanh.)		Halk.vetolujuus 10°C	Halk.vetojäykkyys 10°C
			%	%	%	%	nro		kPa	MPa
K6-B	B	B 160/220	3,0	1,0	3,2	93	X127	refer.	[459]	[130]
							X131	refer.	565	116
							X132	refer.	567	135
							X134	refer.	646	151
							X128	vanh.	467	89
							X129	vanh.	431	68
							X130	vanh.	420	80
							X133	vanh.	475	83
							X135	vanh.	487	71
							ka	refer.	593	134
							ka	vanh.	456	78
K6-B	Suola-pakkasenkest. (jäävä halk.lujuus tai -jäykkyys)								77	58

[ ] = hylätty näyte



## Liite 22

### VBST-massan deformaatiokestävyys, näytekohtaiset tulokset

Ikä 28d, Koestuslämpötila 40 °C

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Bit. pit. %	Tart. pit. %	Vesi- pit. %	Sek. lämpöt. °C	Proct. tiiv. %	Näyte nro	Deform. %
V1-A	A	B 160/220	4,2	0,5	2,5	20-23	98	234	0,4
								235	0,3
								236	0,4
								<b>ka</b>	<b>0,4</b>
V3-A	A	B 160/220	5,2	0,5	2,5	20-23	98	245	0,6
								246	0,5
								247	1,0
								<b>ka</b>	<b>0,7</b>
V8-B	B	B 160/220	4,0	0,5	2,5	20-23	95	197	0,6
								198	0,5
								199	0,5
								<b>ka</b>	<b>0,5</b>
V10-B	B	B 160/220	5,0	0,5	2,5	20-23	95	208	murtui
								209	murtui
								210	3,5
								<b>ka</b>	
V11-B	B	B 160/220	4,5	0,5	2,5	60	95	219	1,2
								220	2,7
								221	2,1
								<b>ka</b>	<b>2,0</b>
V14-B	B	B 650/900	4,0	0,5	2,5	20-23	95	284	murtui
								285	murtui
								286	murtui
								<b>ka</b>	
V15-C	C	B 160/220	3,3	0,5	2,8	20-23	100	301	0,4
								302	0,4
								303	0,4
								<b>ka</b>	<b>0,4</b>

## REST-massan deformaatiokestävyys, näytekohtaiset tulokset

Ikä 28d, Koestuslämpötila 40 °C

Bitumi: B160/220 emulgoituna

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Lisäbit. pit %	Teholl. bit.pit %	Rouhe- tyyppi	Rouhe- pit. %	Kok.- vesipit. %	Proct. tiiv. %	Tiiv. ICT200r %	Näyte nro	Deform. %
R1-A	A	B 160/220 emulsio	2,1	4,1	PAB-B Toimitus- erä 1	50	2,8	94		318	*)
										319	*)
										320	*)
R2-A	A	B 160/220 emulsio	3,0	4,3	PAB-B Toimitus- erä 2	50	4,4	101	96	X48	*)
										X50	*)
										X51	*)
R3-A	A	B 160/220 emulsio	2,0	3,3	PAB-B Toimitus- erä 2	50	3,7		97	M20	0,5
										M21	0,5
										ka	0,5
R4-A	A	B 160/220 emulsio	1,7	3,0	PAB-B Toimitus- erä 2	50	3,5		97	M23	0,5
										M24	0,4
										ka	0,4
R7-B	B	B 160/220 emulsio	1,8	3,8	PAB-B Toimitus- erä 1	50	2,6	93		351	*)
										352	*)
										353	*)
R8-B	B	B 160/220 emulsio	2,7	4,0	PAB-B Toimitus- erä 2	50	4,2	101	96	X68	*)
										X69	*)
										X70	*)
R9-B	B	B 160/220 emulsio	2,0	3,3	PAB-B Toimitus- erä 2	50	3,7		96	M1	1,0
										M2	1,2
										ka	1,1
R10-B	B	B 160/220 emulsio	1,4	2,8	PAB-B Toimitus- erä 2	50	3,4		96	M4	0,4
										M5	0,6
										M6	0,8
										ka	0,6
R11-B	B	B 160/220 emulsio	2,8	4,8	PAB-B Toimitus- erä 1	50	3,3	93		362	*)
										363	*)
										364	*)
R14-C	C	B 160/220 emulsio	2,5	3,5	PAB-B Toimitus- erä 1	25	3,8	94		395	*)
										396	*)
										397	*)
R15-C	C	B 160/220 emulsio	1,9	2,5	PAB-B Toimitus- erä 2	25	3,6		96	M10	1,6
										M11	0,6
										M12	0,7
										ka	1,0
R16-C	B	B 160/220 emulsio	1,3	2,0	PAB-B Toimitus- erä 2	25	3,6		96	M16	0,6
										M17	0,9
										ka	0,7

\*) Näyte särkyi deformaatiokokeessa, joten sille ei saatu deformaatio-kestävyystulosta.

# Liite 24

## KOST-massan deformaatiokestävyys, näytekohtaiset tulokset

Ikä 28d, Koestuslämpötila 40 °C

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Bit. pit	SR- sem.pit.	Vesi- pit.	Proct. tiiv.	Näyte	Deform.
			%	%	%	%	nro	%
K1-A	A	B 160/220	3,2	1,1	4,3	95	412	0,02
							413	0,02
							414	0,01
							<b>ka</b>	<b>0,02</b>
K5-B	B	B 160/220	3,0	1,0	3,2	95	453	0,06
							454	0,02
							455	0,03
							<b>ka</b>	<b>0,04</b>
K8-B	B	B 160/220	4,0	1,1	2,2	95	484	0,04
							485	0,06
							486	0,01
							<b>ka</b>	<b>0,04</b>
K10-B	B	B 650/900	3,0	1,0	3,2	95	509	0,02
							510	0,06
							511	0,04
							<b>ka</b>	<b>0,04</b>
K11-C	C	B 160/220	4,0	1,1	2,2	95	526	0,04
							527	0,03
							528	0,06
							<b>ka</b>	<b>0,04</b>



## VBST-massan jäykkyyssmoduuli, näytekohdaiset tulokset

Ikä 28d, Koestuslämpötila T= 5...25°C

Menetelmä: Dynaaminen 1-akiaaliseen puristukseen perustuva koe

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Bit. pit. %	Tart. pit. %	Vesi- pit. %	Sek. lämpöt. °C	Proct. tiiv. %	Koest. lämpötila °C	Näyte nro	Moduuli Mr MPa	Moduuli Mrk MPa
V1-A	A	B160/220	4,2	0,5	2,5	20-23	98	15	237	1983	1820
									238	2585	2312
									ka	2284	2066
V3-A	A	B160/220	5,2	0,5	2,5	20-23	98	15	248	1971	1891
									249	2054	2554
									ka	2013	2223
V5-B	B	B160/220	3,5	0,5	2,6	20-23	95	15	165	1971	2057
									166	2262	2210
									ka	2117	2134
V6-B	B	B160/220	4,0	0,5	2,5	20-23	85	15	173	813	934
									174	799	1022
									ka	806	978
V7-B	B	B160/220	4,0	0,5	2,5	20-23	90	15	181	1305	1550
									182	1367	1656
									ka	1336	1603
V8-B	B	B160/220	4,0	0,5	2,5	20-23	95	5	189	3074	4453
									190	3291	4291
									ka	3183	4372
V8-B	B	B160/220	4,0	0,5	2,5	20-23	95	15	189	2238	2527
									190	1960	2416
									ka	2099	2472
V8-B	B	B160/220	4,0	0,5	2,5	20-23	95	25	189	1045	1134
									190	910	1068
									ka	978	1101
V10-B	B	B160/220	5,0	0,5	2,5	20-23	95	15	206	2588	2511
									207	2072	2397
									ka	2330	2454

## Liite 25b

### VBST-massan jäykkyyshmoduuli, näytekohtaiset tulokset

Ikä 28d, Koestuslämpötila T= 5...25°C

Menetelmä: Dynaaminen 1-akiaaliseen puristukseen perustuva koe

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Bit. pit. %	Tart. pit. %	Vesi- pit. %	Sek. lämpöt. °C	Proct. tiiv. %	Koest. lämpötila °C	Näyte nro	Moduuli Mr MPa	Moduuli Mrk MPa
V11-B	B	B160/220	4,5	0,5	2,5	60	95	15	217	1829	2222
									218	1759	2054
									ka	1794	2138
V12-B	B	B160/220	3,4	0,5	2,5	20-23	95	15	256	1546	1726
									257	1464	1801
									ka	1505	1764
V13-B	B	B70/100	4,0	0,5	2,5	20-23	95	5	270	3700	3464
									271	2805	2991
									ka	3253	3228
V13-B	B	B70/100	4,0	0,5	2,5	20-23	95	15	270	2148	2347
									271	1956	2511
									ka	2052	2429
V13-B	B	B70/100	4,0	0,5	2,5	20-23	95	25	270	1339	1613
									271	1109	1658
									ka	1224	1636
V14-B	B	B650/900	4,0	0,5	2,5	20-23	95	5	287	1938	1987
									288	2052	2236
									ka	1995	2112
V14-B	B	B650/900	4,0	0,5	2,5	20-23	95	15	287	715	870
									288	745	847
									ka	730	859
V14-B	B	B650/900	4,0	0,5	2,5	20-23	95	25	287	377	544
									288	393	539
									ka	385	542
V15-C	C	B160/220	3,3	0,5	2,8	20-23	100	15	304	1199	1459
									305	1233	1684
									ka	1216	1572

# REST-massan jäykkyysmoduuli, näytekohtaiset tulokset

Ikä 28d, Koestuslämpötila T= 5...25°C

Menetelmä: Dynaaminen 1-akσιαaliseen puristukseen perustuva jäykkyysmoduulikoe

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Lisäbit. pit	Teholl. bit.pit.	Rouhe- tyyppi	Rouhe- pit.	Kok.- vesipit.	Proct. tiiv.	Tiiv. ICT200r	Näyte nro	Moduuli Mr	Moduuli Mrk
			%	%		%	%	%	%		MPa	MPa
R1-A	A	B 160/220 emulsio	2,1	4,1	PAB-B Toimitus- erä 1	50	2,8	94		321	1062	1112
										322	1102	1072
										ka	1082	1092
R2-A	A	B 160/220 emulsio	3,0	4,3	PAB-B Toimitus- erä 2	50	4,4	101	96	X52	1486	1703
										X53	1439	1445
										ka	1462	1574
R5-B	B	B 160/220 emulsio	1,3	3,3	PAB-B Toimitus- erä 1	50	2,3	93		329	815	958
										330	885	1065
										ka	850	1012
R6-B	B	B 160/220 emulsio	1,8	3,8	PAB-B Toimitus- erä 1	50	2,6	89		337	793	894
										338	774	965
										ka	784	930
R7-B	B	B 160/220 emulsio	1,8	3,8	PAB-B Toimitus- erä 1	50	2,6	94		354	1553	2732
										355	1938	3257
										ka	1746	2995
R8-B	B	B 160/220 emulsio	2,7	4,0	PAB-B Toimitus- erä 2	50	4,2	101	96	X71	4586	4579
										X73	2954	4184
										ka	3770	4381
R7-B	B	B 160/220 emulsio	1,8	3,8	PAB-B Toimitus- erä 1	50	2,6	93		354	987	1266
										355	1005	1481
										ka	996	1374
R8-B	B	B 160/220 emulsio	2,7	4,0	PAB-B Toimitus- erä 2	50	4,2	101	96	X71	2447	2608
										X73	1742	1829
										ka	2094	2219
R7-B	B	B 160/220 emulsio	1,8	3,8	PAB-B Toimitus- erä 1	50	2,6	93		354	476	649
										355	478	746
										ka	477	698
R8-B	B	B 160/220 emulsio	2,7	4,0	PAB-B Toimitus- erä 2	50	4,2	101	96	X71	1061	1131
										X73	893	1179
										ka	977	1155
R11-B	B	B 160/220 emulsio	2,8	4,8	PAB-B Toimitus- erä 1	50	3,3	93		365	1110	1289
										366	1419	1495
										ka	1265	1392
R12-B	B	B 160/220 emulsio	3,6	4,6	PAB-B Toimitus- erä 1	25	4,5	92		373	1187	1124
										374	1198	1401
										ka	1193	1263
R13-B	B	B 160/220 emulsio	2,0	3,7	AB	50	2,8	93		381	1982	2047
										382	1684	2157
										ka	1833	2102
R14-C	C	B 160/220 emulsio	2,5	3,5	PAB-B Toimitus- erä 1	25	3,8	94		398	945	1181
										399	1173	1478
										ka	1059	1330




**KOST-massan jäykkyysmoduuli, näytekohtaiset tulokset**

Ikä 28d, Koestuslämpötila T= 5...25°C

Menetelmä: Dynaaminen 1-akiaaliseen puristukseen perustuva koe

Koost. tunnus	Rakei- suus	Bitumi- laji	Bit. pit. %	SR- sem %	Vesi- pit. %	Proct. tiiv. %	Koest. lämpöt. °C	Näyte nro	Moduuli Mr MPa	Moduuli Mrk MPa
K1-A	A	B 160/220	3,2	1,1	4,3	95	15	415	7026	6769
								416	6506	6809
								ka	<b>6766</b>	<b>6789</b>
K2-B	B	B 160/220	2,5	1,0	3,8	95	15	423	7609	5663
								424	8186	5849
								ka	<b>7898</b>	<b>5756</b>
K3-B	B	B 160/220	3,0	1,5	3,3	95	15	431	5790	6173
								432	9509	11484
								ka	<b>7650</b>	<b>8829</b>
K4-B	B	B 160/220	3,0	1,0	3,2	90	15	439	3170	2708
								440	3380	2800
								ka	<b>3275</b>	<b>2754</b>
K5-B	B	B 160/220	3,0	1,0	3,2	95	5	456	5525	5553
								457	5645	7021
								ka	<b>5585</b>	<b>6287</b>
K5-B	B	B 160/220	3,0	1,0	3,2	95	15	456	5540	5085
								457	6819	6291
								ka	<b>6180</b>	<b>5688</b>
K5-B	B	B 160/220	3,0	1,0	3,2	95	25	456	4668	4184
								457	5074	5249
								ka	<b>4871</b>	<b>4717</b>
K7-B	B	B 160/220	3,0	2,0	3,4	95	15	470	8158	9386
								471	8068	8983
								ka	<b>8113</b>	<b>9185</b>
K8-B	B	B 160/220	4,0	1,0	2,2	95	5	487	4724	5976
								488	5246	7301
								ka	<b>4985</b>	<b>6639</b>
K8-B	B	B 160/220	4,0	1,0	2,2	95	15	487	3837	4876
								488	4843	5808
								ka	<b>4340</b>	<b>5342</b>
K8-B	B	B 160/220	4,0	1,0	2,2	95	25	487	2917	3533
								488	3817	3723
								ka	<b>3367</b>	<b>3628</b>
K9-B	B	B 70/100	2,6	0,9	2,1	95	15	501	3859	4853
								502	2480	3674
								ka	<b>3170</b>	<b>4264</b>
K10-B	B	B 650/900	3,0	1,0	3,2	95	15	512	7700	6918
								513	7106	7851
								ka	<b>7403</b>	<b>7385</b>
K11-C	C	B 160/220	2,5	0,8	4,0	95	15	529	3133	1997
								530	2797	2150
								ka	<b>2965</b>	<b>2074</b>



ISSN 1459-1553  
ISBN 978-951-803-963-4  
TIEH 3201070-v